



Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan
korkeakoulu

Kemian tekniikan korkeakoulu
Kemian tekniikan tutkinto-ohjelma

Maija Renkonen

Esisaostuksen mahdollisuudet aktiivilieteprosessin kuormitusvaihteluiden hallinnassa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 16.9.2014.

Valvoja

Professori Heikki Ojamo

Ohjaaja

Diplomi-insinööri Risto Saarinen

Tekijä Maija Renkonen

Työn nimi Esisaostuksen mahdollisuudet aktiivilieteprosessin kuormitusvaihteluiden hallinnassa

Laitos Biotekniikan ja kemian tekniikan laitos

Professuuri Bioprosessitekniikka

Professuurikoodi Ke-70

Työn valvoja Heikki Ojamo

Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t) Risto Saarinen

Päivämäärä 5.9.2014

Sivumäärä 114

Kieli suomi

Tiivistelmä

Tässä diplomityössä tutkittiin Porvoon Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla esisaostusta. Lumiensulamisvettä ja sadevettä päätyy puhdistamolle, jolloin puhdistamon biologisen puhdistusprosessin kapasiteetti ylittyy. Jätevettä joudutaan johtamaan tämän puhdistusvaiheen ohi esiselkeytyksestä suoraan vesistöön. Ohitusvedet nostavat lähtevän jäteveden ravinne- ja kiintoainepitoisuuksia. Vuonna 2015 voimaantuleva lupaehto täyttynee nykyisillä puhdistusmenetelmillä, paitsi huippuvirtaamavuorokausina. Esisaostus parantaa esiselkeytetyn jäteveden puhdistustuloksia. Diplomityössä tutkittiin esisaostuksen riittävyyttä täyttämään oletettavasti tulevaisuudessa kiristyvän fosforilupaehdon pitoisuuden 0,3 mg/l.

Laboratoriosaostuskokeilla vertailtiin neljää eri kemikaalia, jotka olivat PAX-XL100, PAX-XL60, PIX-105 ja ALF-30. PAX:t ovat polyalumiinikloridiliuoksia, PIX on ferrisulfaattiliuos ja ALF on alumiini- ja ferrisulfaatin seos. Näistä kemikaaleista PAX-XL100 saosti fosforia tehokkaimmin. PAX-XL100 saavutti annostuksella 100 g/m³ fosforipitoisuuden 0,3 mg/l. Laitosmittakaavan kokeissa PAX-XL100 saavutti samalla annostuksella fosforipitoisuuden 1,3 mg/l. Esisaostuksen tehoa huippuvirtaamavuorokausina ei pystytty tutkimaan, koska keväällä 2014 ei ollut huippuvirtaamavuorokausia. Laskennallisesti kevään 2012 huippuvirtaamakaudella esisaostus olisi riittänyt täyttämään fosforin lupaehtopitoisuuden 0,3 mg/l.

Activated Sludge Model 4.0 -ohjelmalla tutkittiin huippuvirtaamavuorokautena ravinnekuorman vaikutusta aktiivilieteprosessiin kahdella käytössä olevalla eri ajotavalla. Ajotapoina käytettiin ”biologista ravinteiden poistoa” ja ”tehostettua kemiallista käsittelyä” eli ”tulva”-ajotapaa. Ajotavat eroavat toisistaan ilmastusaltaalle johdettavan tulevan ja esiselkeytetyn jäteveden määrissä. Tuleva jätevesi sisältää enemmän ravinteita kuin esiselkeytetty jätevesi. ”Biologisella ravinteiden poisto” -ajotavalla ilmastusaltaalle johdetaan yhtä paljon tulevaa kuin esiselkeytettyä jätevettä ja ”tulva”-ajotavalla pelkästään tulevaa jätevettä.

Näiden ajotapojen typenpoistontulokset eivät eronneet merkittävästi. Tästä pääteltiin, että ilmastusaltaan kapasiteetti riittää kompensoimaan laimeamman ravinnekuorman. Biologiseen prosessiin ei kuitenkaan voida johtaa yli 1000 m³/h:n virtaamaa ilman, että jälkiselkeytysaltaasta karkaa ravinteita ja kiintoainetta. Simuloinnin avulla pääteltiin, että aktiivilieteprosessin rajoittava tekijä on jälkiselkeytysaltaan pinta-ala kasvaneen pintakuorman ja lyhyemmän viipymän takia, eikä ilmastusaltaalle syötettävä ravinnepitoisuus.

Avainsanat Kemiallinen saostus, aktiivilieteprosessi, fosforinpoisto

Author Maija Renkonen

Title of thesis The possibilities of pre-precipitation for the management of the load variation of the activated sludge process

Department Department of Biotechnology and Chemical Technology

Professorship Bioprocess technology

Code of professorship Ke-70

Thesis supervisor Heikki Ojamo

Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) Risto Saarinen

Date 5.9.2014

Number of pages 114

Language English

Abstract

This is a study of pre-precipitation at Hermanninsaari wastewater treatment plant. Water from melting snow and rain end up at the Hermanninsaari treatment plant, exceeding the volume of its biological treatment process. That is why wastewater must by-pass this stage of the treatment process and it is lead straight to the sea via presedimentation. These by-pass wastewaters raise the levels of the concentration of nutrients and suspended solids in the effluent. The conditions of the new environmental permit, valid from 2015 onwards, would be met by using the current treatment methods except during peak flow days. Pre-precipitation improves the treatment results of presedimented wastewater. This Master's thesis studied whether pre-precipitation was adequate to meet the conditions concerning phosphorus in the environmental permit likely to be 0,3 mg/l.

Four chemicals PAX-XL100, PAX-XL60, PIX-105 and ALF-30 were tested in the laboratory for phosphorus precipitation. The PAXes are polyaluminiumchloride solutions. The PIX is ferrisulphate solution. The ALF is a mix of aluminiumsulphate and ferrisulphate. PAX-XL100 was the most efficient one. Using a dose of 100 g/m³ PAX-XL100, level of 0,3 mg/l was achieved. On an industrial scale at Hermanninsaari plant PAX-XL100 achieved the scale of 1,3 mg/l with the same dosage. The efficiency of the pre-precipitation during peak flow days could not be tested because there were no such days in spring 2014. Peak flow data from 2012 was used to calculate that pre-precipitation during peak flow days would have met the phosphorous conditions of the 0,3 mg/l in the environmental permit.

The impact of the nutrient load on the activated sludge process was studied using the Activated Sludge Simulation 4.0 program into two different versions. They were "Biological Removal of Nutrients" and "Intensified Chemical Treatment", also known as "Flood". These versions differ from each other in the amounts of the influent wastewater and presedimented wastewater lead to the aeration tank. The former leads equal amounts of influent and presedimented wastewater and the latter only influent wastewater.

There were no significant differences between the two versions in the removal of nitrogen. Hence, the capacity of the aeration tank is enough to compensate for low concentration of nutrients. However it is not possible to lead the flow of more than 1000 m³/h without nutrients and suspended solids escaping secondary sedimentation. Using the simulation it was deduced that limiting factor of the activated sludge process was the area of the secondary sedimentation owing to the increased surface load and the shortened residence time.

Keywords Chemical precipitation, activated sludge process, phosphorus removal

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty kesän 2013 ja kevään 2014 aikana Porvoon veden Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla. Ohjaajaani Risto Saarista kiitän mielenkiintoisesta ja monipuolisesta aiheesta, sekä useista uusista näkökulmista ja jatkuvasta kannustamisesta!

Työhön kuului paljon laboratorio- ja laitosmittakaavan kokeita. Nämä onnistuivat hyvin, koska sain paljon apua Hermanninsaaren puhdistamon mahtavalta käyttöhenkilökunnalta Lauralta, Matiakselta, Rikulta, Sunelta, Stefanilta ja Karilta. En olisi voinut toivoa ihanampia työkavereita tai kotoisampaa työilmapiiriä! Kiitän Lauraa uskosta tutkimukseeni ja monista hyödyllisistä neuvoista. Kiitän Matiasta tärkeästä kannustamisesta erityisesti vaikeina päivinä ja suuresta avusta tekstin viimeistelyvaiheessa. Kiitän Sunea ja Rikua ahkerasta näytteiden hausta ja monien koe- ja näytteidenoton järjestelyjen toteuttamisesta. Kiitän Stefania avusta monissa käytännön asioissa ja rohkaisevasta asenteesta sekä kiitän Karia yllätyksellisistä työpäivistä.

Kiitos Porvoon veden muulle henkilökunnalle avusta ja kannustavasta työyhteisöstä. Kiitos Uudenmaan ELY-keskukselle rahoituksesta ja korvaamattomista neuvoista simulointiohjelman käyttöön liittyen. Kiitos myös Kemiralle monista hyödyllisistä materiaaleista tutkimustani varten ja opastuksesta saostuskokeisiin.

Sain paljon tukea työhöni perheeltäni ja ystäviltäni. Kiitos vanhemmilleni ja sisaruksilleni Merille, Suville ja Ollille koko opiskelun aikaisesta kiinnostuksesta ja kannustamisesta. Kiitos siskontyttärelleni Lumille, serkulleni Ainolle ja tädilleni Tuulille. Kiitos kaikille ihanille teekkariystävilleni ja erityiskiitos Aralle, Mikolle, Ellalle, Elinalle, Sakarille, Susannelle ja Niinalle. Kiitän myös rakkaita ystäviäni Kristaa, Elliä, Heidiä ja Sannaa, jotka ovat olleet korvaamaton tuki läpi opiskeluaajan!

Espoossa 16.9.2014

Maija Renkonen

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Johdanto..... | 1 |
| 2. | Fosfori jätevedessä | 3 |
| 2.1 | Esiintyvyys ja kemiallinen saostus | 3 |
| 2.1 | Koagulaatio ja destabilointi | 5 |
| 2.2 | Flokkaus..... | 11 |
| 2.3 | Saostukseen käytetyt kemikaalit | 13 |
| 2.3.1 | Alumiinipohjaiset kemikaalit..... | 13 |
| 2.3.2 | Rautapohjaiset kemikaalit..... | 15 |
| 2.3.3 | Kalsiumpohjaiset kemikaalit..... | 16 |
| 3. | Biologinen puhdistusprosessi | 17 |
| 3.1 | Mikrobien prosessit jätevedessä | 17 |
| 3.2 | Aktiivilieteprosessi | 19 |
| 3.3 | Typenpoisto | 24 |
| 3.3.1 | Nitrifikaatio..... | 24 |
| 3.3.2 | Denitrifikaatio | 26 |
| 3.4 | Fosforinpoisto biologisesti..... | 27 |
| 4. | Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamo | 29 |
| 4.1 | Yleistä | 29 |
| 4.2 | Prosessin kuvaus | 30 |
| 4.3 | Puhdistusprosessin ajotavat | 34 |
| 4.4 | Puhdistustulokset | 35 |

KOKEELLINEN OSUUS

| | |
|--|----|
| 5. Laboratoriosaostuskokeet | 40 |
| 5.1 Laboratoriosaostuskokeiden menetelmät..... | 40 |
| 5.2 Laboratoriosaostuskokeiden tulokset..... | 42 |
| 5.3 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset..... | 45 |
| 6. Laitosmittakaavan esisaostuskokeet | 46 |
| 6.1 Laitosmittakaavan kokeiden menetelmät..... | 46 |
| 6.2 Laitosmittakaavan kokeiden tulokset..... | 48 |
| 6.3 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset..... | 54 |
| 7. Hermanninsaaren puhdistamon fosforin kuormituslaskenta | 55 |
| 8. Kuormitusvaihteluiden seuraukset biologiseen prosessiin | 61 |
| 8.1 Teoria | 61 |
| 8.2 Simulointi..... | 65 |
| 8.2.1 Mitoitusvirtaamavuorokausi | 66 |
| 8.2.2 Huippuvirtaamavuorokausi..... | 76 |
| 8.2.2.1 ”Biologinen ravinteidenpoisto” -ajotapa | 77 |
| 8.2.2.2 ”Tulva”-ajotapa..... | 81 |
| 9.3 Simuloinnin johtopäätökset | 86 |
| 9. Yhteenveto..... | 87 |
| 10. Lähteet | 89 |

LIITTEET

LIITE 1 Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon prosessikaavio

LIITE 2 Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon puhdistustulokset 2013

LIITE 3 PAX-XL100 saostuskemikaalin tuote-esite

LIITE 4 PAX-XL60 saostuskemikaalin tuote-esite

LIITE 5 PIX-105 saostuskemikaalin tuote-esite

LIITE 6 ALF-30 saostuskemikaalin tuote-esite

LIITE 7 Saostuskemikaali-PAX:n syöttötiedot keväällä 2014

LIITE 8 Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon virtaama- ja lietemäärät keväällä 2012

LIITE 9 Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon fosforikuormat- ja pitoisuudet keväällä 2012, toteutuneet arvot sekä laskennalliset arviot esisaostuksen vaikutuksista

Lyhenteet

| | |
|------------------------------|---|
| ALF | Alumiini- ja ferrisulfaatin seos |
| ASM | Activated Sludge Model -simulointiohjelma |
| AVL | Asukasvastineluku |
| BOD ₇ | Biological oxygen demand; Biologinen hapenkulutus |
| COD | Chemical oxygen demand; Kemiallinen hapenkulutus |
| ESL | Esiselkeytyksestä lähtevä vesi |
| EST | Esiselkeytykseen tuleva vesi |
| NH ₄ ⁺ | Ammoniumioni |
| NO ₃ ⁻ | Nitraatti-ioni |
| N _{tot} | Kokonaistypen määrä |
| PAX | Polyalumiinikloridiliuos |
| PIX | Ferrisulfaattiliuos |
| P _{tot} | Kokonaisfosforin määrä |

1. Johdanto

Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla käsitellään Porvoon ja Askolan kunnalliset jätevedet. Puhdistamo on mitoitettu 38 600 asukkaan jätevesille (asukasvastineluku) ja sen mitoitusvirtaama on 13 200 m³/d. Puhdistusprosessi perustuu mekaanisiin, kemiallisiin ja biologisiin menetelmiin. Liitteenä 1 on esitetty laitoksen prosessikaavio. Puhdistamo on otettu käyttöön vuonna 2001. Diplomityön aikana voimassa olleet puhdistamon ympäristöluvut on määrätty (taulukko 1) biologiselle hapenkulutukselle (BOD₇), kokonaisfosforin määrälle ja kemialliselle hapenkulutukselle (COD). Lupaehdot määritetään neljännesvuosikeskiarvoina sekä pitoisuuksina että puhdistusreduktiona. Kokonaistypen poistoteho lasketaan vuosikeskiarvona. Lähtevän jäteveden lisäksi lupaehtoihin lasketaan mukaan viemäriverkoston ylivuodot ja ohijuoksutukset.

Taulukko 1. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon lupaehdot. (VaHaO, 2005)

| Parametri | Lupaehdot | | | |
|------------------|-------------------------|------|----------------|------|
| | Neljännesvuosikeskiarvo | | Vuosikeskiarvo | |
| | mg/l | % | mg/l | % |
| BOD ₇ | < 10 | > 95 | - | - |
| Kok. fosfori | < 0,5 | > 93 | - | - |
| COD | < 60 | > 90 | - | - |
| Kok. typpi | - | - | - | > 70 |

Nykyiset lupaehdot vanhenevat ja uudet ovat tulossa voimaan 2014–2015. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon lähtevän veden fosforipitoisuuden ympäristölupa oletettavasti kiristyy uuden lupaehdon myötä. Lähes kaikilla muilla Suomenlahden puhdistamoilla on jo alhaisempi luparaja fosforille. Nykyinen luparaja fosforille on 0,5 mg/l ja tuleva oletettavasti 0,3 mg/l. Tällä hetkellä puhdistustulokset täyttävät mahdollisesti tulevan luparajan, paitsi toisen vuosineljänneksen aikana. Vuoden 2013 puhdistustulokset on esitetty liitteessä 2. Toisen vuosineljänneksen aikana lumien sulamisvedet aiheuttavat jätevedenpuhdistamon kapasiteetin ylittymisen. Tämän seurauksena kapasiteetin ylittävät jätevedet joudutaan johtamaan esiselkeytyksen jälkeen biologisen käsittelyn ohi. Ohitusvedet johdetaan puhdistetun jäteveden mukana vesistöön, jolloin ne nostavat lähtevän jäteveden ravinne- ja kiintoainepitoisuuksia.

Hermanninsaareissa tiukempiin lupaehtoihin voidaan päästä tehostamalla koko puhdistusprosessia tai puhdistamalla tehokkaammin ohitusvesiä. Erilaisia puhdistusprosessivaihtoehtoja ovat mm. esisaostus, ohitusvesien erilliskäsittely ja tertiäärivaiheen hiekkasuodatus. Laskennallisesti nämä kaikki menetelmät riittäisivät tiukemman lupaehdon fosforiehtojen täyttämiseen (Kuokkanen, 2012). Investointi- ja käyttökustannuksiltaan näistä edullisin vaihtoehto on esisaostus. Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutkia esisaostuksen riittävyyttä kokeellisesti.

Kesällä 2013 tutkittiin eri vaihtoehtoja saostuskemikaaliksi laboratoriossa flokkulaattoreilla. Tehokkain kokeissa käytetty saostuskemikaali oli polyalumiinikloridi. Keväällä 2014 esisaostusta tutkittiin laitosmittakaavassa, jolloin polyalumiinikloridia annosteltiin esiselkeytykseen johdettavaan jäteveteen. Kokeiden suorittamisen aikana ei vähälumisesta talvesta johtuen tullut ohitusvesiä. Kokeista saatujen tulosten perusteella laskettiin, olisiko esisaostus riittänyt huippuvirtaamavuotena tehostamaan puhdistusprosessia tarpeeksi, jotta mahdolliset uudet luparajat täytyisivät. Lisäksi työssä tutkittiin biologista jätevedenpuhdistusta Activated Sludge Model 4.0 –mallinnusohjelman avulla. Tämän mallinnuksen tarkoituksena oli vertailla eri ajotapoja ja löytää niistä tehokkain.

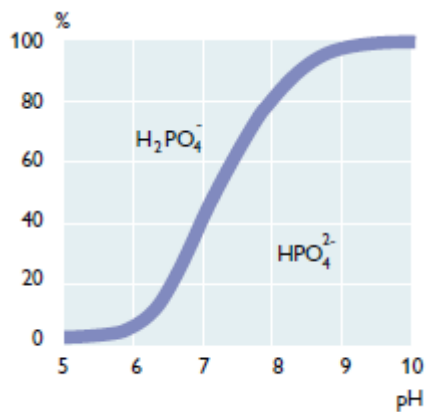
2. Fosfori jätevedessä

Fosforia poistetaan jätevedestä, koska se on toinen merkittävistä pääravinteista typen lisäksi. Ajoittain fosfori on Suomenlahdessa minimiravinne, jolloin se rajoittaa rehevöitymistä. Rehevöitymisen seurauksena vesistöjen luonnolliset ekosysteemit ja biodiversiteetti kärsivät. (Oravainen, 2007)

Fosforin puhdistustekniikat jätevedestä voidaan jakaa mekaanisiin, kemiallisiin ja biologisiin menetelmiin. Kiintoaineeseen sitoutunutta fosforia poistetaan mekaanisesti selkeytysaltaissa jätevettä laskeuttamalla, mikä usein yhdistetään kemiallisiin menetelmiin Suomen jätevedenpuhdistamoilla. Kemialliseksi saostukseksi luetaan kaikki ne prosessit, joissa kemikaalin lisäyksellä saadaan veden liukoisista ja kolloidisista aineista muodostettua liukenemattomia ja erottumiskykyisiä partikkeleita. Fosforin kemiallinen saostus onkin kaikista yleisin puhdistusprosessi. Biologisesti fosforia poistuu jätevedestä sitoutumalla biomassaan ja osa liukoisesta fosforista poistuu tiettyjen bakteerien aineenvaihdunnan kautta olosuhteiden ollessa suotuisat. Biologinen fosforin poisto esitellään tarkemmin luvussa 3.2. (Isoaho, 1986)

2.1 Esiintyvyys ja kemiallinen saostus

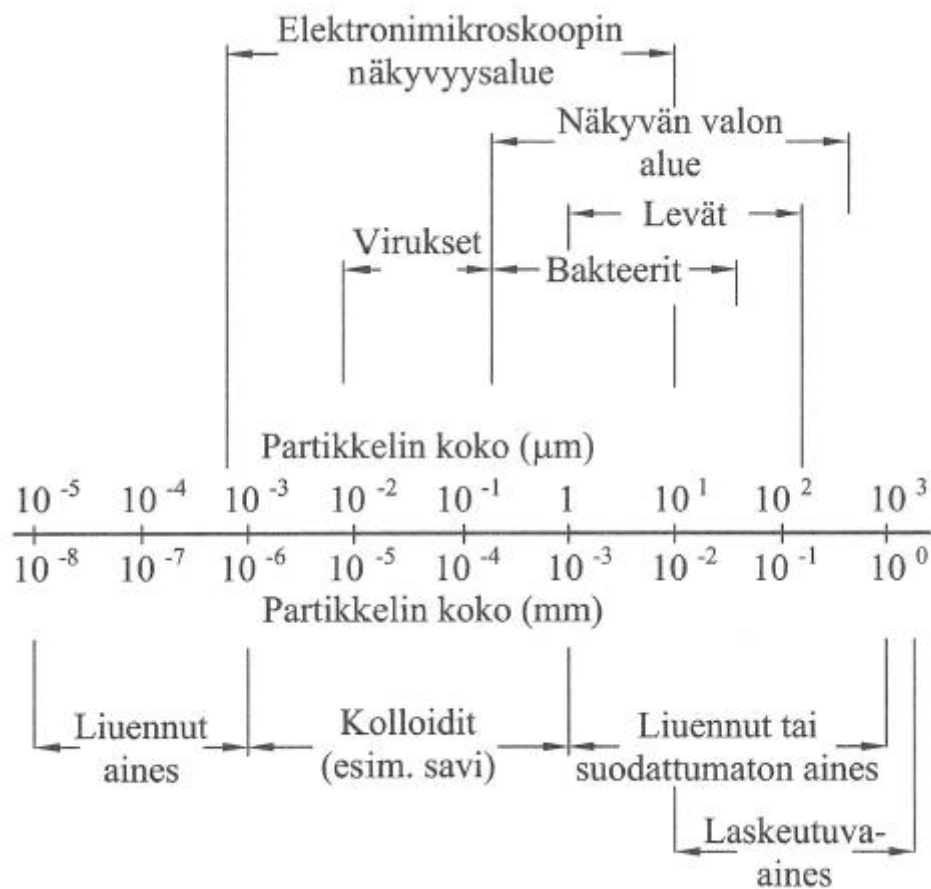
Jätevedessä fosfori esiintyy liukoisena fosforina ja kiintoaineeseen sitoutuneena fosforina. Liukoisena fosfori esiintyy eri yhdisteissä, kuten polyfosfaateissa (esim. $\text{P}_2\text{O}_6^{2-}$, $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$, $\text{P}_3\text{O}_9^{3-}$) ja ortofosfaatteina (HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-). Kuvasta 1 näkyy pH:n vaikutukset eri ortofosfaattimuotojen esiintyvyyteen. Jätevedessä esiintyy runsaasti erilaisia bakteereja, joiden proteiinit ja solukalvot sisältävät paljon fosforia. Fosforia esiintyy myös monissa orgaanisissa yhdisteissä, erityisesti solujen metabolian kannalta tärkeissä nukleosidifosfaateissa. (Duenas, 2002)



Kuva 1. Divetyfosfaatin ja vetyfosfaatin esiintyvyydet pH:n funktiona. (Kemira, 2003)

Saostus jaetaan neljään eri vaiheeseen: kemikaalin syöttöön, koagulaatioon, flokkaukseen ja erotukseen. (Henze, 2000) Kemiallinen saostus ei saosta orgaanista fosforia vaan pelkästään epäorgaanista fosforia ja ortofosfaatteja. Saostuksen yhteydessä suspendoituneet orgaaniset aineet sitoutuvat saostumaan, minkä takia orgaanista fosforia saadaan myös poistettua jätevedestä saostamalla. (Clark, 1997)

Jäteveden partikkelit voidaan jakaa liuenneisiin, kolloideihin ja suspensioihin. Kuvassa 2 on esitetty eri partikkelien halkaisijakokoja. Suspensioita on nimitetty tässä kuvaajassa liuenneeksi tai suodattumattomaksi aineeksi. (RIL 124-1, 2004)



Kuva 2. Epäpuhtauksien koot vedessä ja jätevedessä. (RIL 124-1, 2004)

Aineet voidaan luokitella niiden liukoisuuden mukaan. Liuenneiden partikkeleiden halkaisija on pienempi kuin $10^{-3}\mu\text{m}$, kolloidien halkaisija on välillä 10^{-3} - $1\mu\text{m}$, primaaristen partikkeleiden halkaisijan koko on välillä 1 - $100\mu\text{m}$ ja laskeutuvien flokkien halkaisija on suurempi kuin $100\mu\text{m}$. (Poutanen, 2012)

2.1 Koagulaatio ja destabilointi

Koagulaatio tarkoittaa prosesseja, joissa saostettavien kolloidihiuksien sähköisten kaksoiskerrosten muodostamia potentiaalienergian hylkimisvaikutuksia pienennetään. Tämän jälkeen kolloidihiuksat voivat sitoutua toisiinsa ja muodostaa suurempia flokkeja. Saostus tapahtuu samaan aikaan kuin koagulaatio, koska molemmat ovat nopeita reaktioita. Annosteltavat kemikaalit ovat useimmiten metallisuoloja. Ortofosfaatti-ionit reagoivat metallikationien kanssa. Koagulaation aikana saostuvat

partikkelit yhdistyvät muiden jäteveden hiukkasten kanssa primaarisiksi partikkeleiksi, joiden halkaisija on 10–50 µm. (Isoaho, 1986)

Saostuskemikaalin annostelun ja koagulaation kannalta tärkeää on pikasekoitus. Jätevedenpuhdistamoilla ei useimmiten tarvita erillistä sekoitusvaihetta, koska jäteveden virtaus prosessissa riittää saamaan aikaan riittävän turbulenssin sekoituksen varmistamiseksi. Riittävä sekoitus heti kemikaalin annostelun jälkeen takaa saostuskemikaalin metallikationien tasaisen jakautumisen jäteveeseen. Tällöin metallikationit reagoivat suoraan ortofosfaattien kanssa ja hydroksidi-ionien väliset reaktiot vähentyvät. Tasaisen sekoittumisen kannalta saostuskemikaalin annostelu on helpompaa nestemäisenä kuin kiinteänä. (Ismail, 2011)

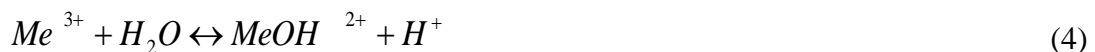
Tyypillisesti saostuskemikaaleina käytetään raudan ja alumiinin suoloja. Rautakationit voivat olla varaukseltaan joko +2 (ferrorauta) tai +3 (ferrirauta). Ferri-ionit ovat tehokkaampia saostajia jäteveden puhdistuksessa. Niiden tehokkuus perustuu siihen, että ferrirauta muodostaa niukkaliukoisia yhdisteitä laajemmalla pH-alueella kuin ferrorauta. Ferrorauta hapetetaan esi-ilmastusaltaassa ja ilmastusaltaan hapellisissa lohkoissa ferriraudaksi. Hapetusreaktio on esitetty kaavassa 1. (Henze, 2000)



Raudan hapettamisreaktioon kuluu 0,14 g O₂ / 1 g Fe²⁺. Alumiinikationit ovat varaukseltaan +3. Molemmat metallit reagoivat ortofosfaatti-ionien kanssa. Ferri- ja alumiinikationit reagoivat samojen reaktioiden kautta, joten niitä voidaan merkitä Me³⁺. Metallikationien reaktiot jätevedessä on esitetty kaavoissa 2 ja 3. (Henze, 2000)



Kaavan 2 yhtälö on saostuksen primaarinen reaktio ja kaavan 3 reaktio on sivureaktio. Molemmat reaktiot kuluttavat alkaliteettia ja laskevat pH:ta. Sivureaktiossa 3 ei saostu fosforia, mutta metallihydroksideista on kuitenkin hyötyä flokkauksessa, mikä selitetään tarkemmin kappaleessa 2.2. Jätevesi sisältää huomattavasti enemmän vesimolekyylejä kuin ortofosfaatti- tai vetykarbonaatti-ioneja. Tämän takia on paljon todennäköisempää, että metallikationi reagoi vesimolekyylien kanssa. Reaktiot on esitetty kaavoissa 4, 5 ja 6. (Sykes, 1966)



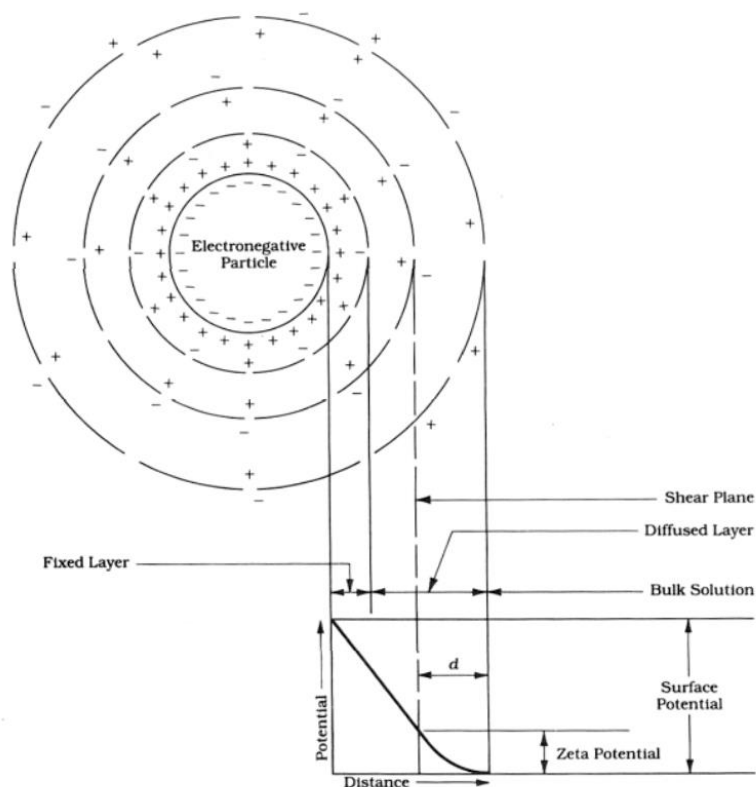
Nämä reaktiot ovat hyvin nopeita ja niissä syntyy metallihydroksideja. Sivutuotteena syntyy vety-ioneja, jotka kuluttavat veden alkaliteettia. Ferroraudan ja alumiinin polymerisaatioreaktiot eroavat toisistaan ja niistä on kerrottu tarkemmin luvuissa 2.3.1 ja 2.3.2. (Henze, 2000)

Koagulaatioon vaikuttavat merkittävästi aineiden hydrofobisuus tai hydrofiilisyyt, zeta-potentiaali ja isoelektrinen piste. Hydrofobiset kolloidit hylkivät vettä ja hydrofiiliset sitoutuvat helposti vesimolekyyleihin tai absorboivat vettä. Yleisellä tasolla voidaan sanoa, että orgaaniset kolloidit ovat hydrofobisia ja epäorgaaniset kolloidit hydrofiilisiä. Hydrofiilisyyt muodostuu kolloidin pinnassa olevien funktionaalisten ryhmien muodostaessa vetysidoksia vesimolekyylien kanssa. Vedestä muodostuu kolloidin ympärille suojakerros, jonka ulkopuolella vesi on vapaana. Suojakerroksen vettä kutsutaan sitoutuneeksi vedeksi. Hydrofobiset kolloidit eivät muodosta sitoutuneesta vedestä suojakerrosta. (Henze, 2000)

Jäteveden kolloidit ovat pääasiallisesti negatiivisesti varautuneita. Partikkeleiden primaarinen varaus muodostuu funktionaalisten ryhmien dissosioitumisesta. Tällaisia ryhmiä ovat tyypillisesti amino-, hydroksyyli- ja happoryhmät. Näistä ryhmistä vety-

ioni adsorboituu vesifaasiin ja partikkeli jää negatiivisesti varautuneeksi. Primaarinen varaus vetää puoleensa vastakkaisesti varautuneita ioneja, joita kutsutaan vastaioneiksi. Tiiviin vastaionikerroksen jälkeen muodostuu positiivisesti varautuneista hiukkasista diffuusiokerros, joka harvenee kolloidista ulospäin. Diffuusiokerroksen paksuus on suoraan verrannollinen veden ioniväkevyyteen. Ioniväkevyyden pienentyessä diffuusiokerroksen paksuus kasvaa. Tämä voidaan selittää sillä, että ioneilla on tällöin enemmän vapaata tilaa käytössään. (RIL 124-1, 2004)

Diffuusiokerroksen ulkopuolella on veden bulkkikerros, jossa ionit liikkuvat vapaasti. Primaarivaraus ja vastaionikerros muodostavat sähköisen kaksoiskerroksen. Diffuusiokerroksessa on jakopinta, joka sijoittuu partikkeliin sitoutuneen veden ja vapaasti liikkuvan veden rajapintaan. Jakopinta siis rajaa sidotun ja vapaan veden rajapinnan. Tämän jakopinnan potentiaalia kutsutaan zeta-potentiaaliksi. Jakopinnan sijoittuminen diffuusiokerroksessa vaihtelee partikkelin hydrofiilisyyden/-fobisuuden mukaan. Zeta-potentiaalin merkitys koaguloinnissa perustuu siihen, että se kuvaa sähköisten hylkimisvoimien suuruutta eli kolloidin stabiiliutta. Kuvassa 3 on esitetty negatiivisesti varautuneen kolloidin sähköiset jakaumat ja niiden potentiaalit. (Henze, 2000) (Poutanen, 2012)



Kuva 3. Negatiivisesti varautunut partikkeli, sen sähköiset jakaumat ja niiden potentiaalit. (Jin, 2005).

Isoelektrisellä pisteellä tarkoitetaan pH-arvoa, jolloin orgaanisten ja epäorgaanisten partikkeleiden pintavarausten kokonaisvaraus on 0. Tyypillisesti jätevesissä isoelektrinen piste saavutetaan, kun pH on noin 3-5. Tämä tarkoittaa, että jäteveden partikkeleiden varaus on negatiivinen neutraalissa pH:ssa. Jäteveden pH-arvo vaihtelee arvojen 6-10 välillä. Partikkelien varaukset syntyvät niiden pinnalla olevien funktionaalisten ryhmien happo- ja emäsominaisuuksista. Orgaanisissa partikkeleissa merkittävimmät ryhmät ovat amino- ja karboksyylihapporyhmät. Isoelektristä pistettä voidaan siirtää lisäämällä veteen kationeita. Esimerkiksi kalsiumionit sitoutuvat karboksyylihapporyhmiin, jolloin kokonaisvaraus muuttuu negatiivisesta positiiviseksi. Kolloidisten partikkelien pintavarausten poistaminen heikentää sähköisen kaksoiskerroksen vaikutusta. Tällöin partikkelit pystyvät liikkumaan lähemmäksi toisiaan ja muodostamaan flokkeja. Flokkien muodostumisessa van der Waalsin voimat ovat suurimmat partikkelien väliset vetovoimat. (Henze, 2000)

Kolloidit on destabiloitava, jotta ne voivat muodostaa flokkeja. Destabiloimiseen on neljä eri ilmiötä. Ensimmäisen ilmiön tarkoituksena on tiivistää diffuusiokerroksen paksuutta. Veden ionivahvuus kasvaa elektrolyytin lisäyksellä. Tämä lisäys nostaa diffuusiokerroksen varaustiheyttä ja samalla kerros painuu lähemmäksi partikkelin pintaa eli diffuusiokerros ohenee. Tämän seurauksena zeta-potentiaali pienenee huomattavasti. (Jin, 2005)

Toisen ilmiön mukaan veteen lisätään positiivisesti varautunutta koagulanttia eli saostuskemikaalia. Kolloidien pinnalle adsorboituu ioneja, jotka neutraloivat pintavarausten. Tämän seurauksena aggregaatio eli partikkelien yhteenliittyminen on mahdollista. Haasteena on koagulantin oikean annostelumäärän löytäminen. Jos annostelu on liian suuri, ei pintavaraus neutraloidu vaan jää positiiviseksi. Tämän takia kemikaaliannostelu tulee mitoittaa vedessä olevien kolloidien pitoisuuden mukaan. (Jin, 2005)

Kolmannessa ilmiössä kolloidit sitoutuvat saostuman sisälle. Tavallisimmat saostuskemikaalit muodostavat metallihydroksideja, jotka sitovat hyvin kolloideja etenkin flokkauksen aikana. Jäteveden saostuksessa käytetyt rauta- ja alumiinikemikaalit muodostavat hydroksideja ja niiden muodostuminen on esitetty reaktioyhtälössä 3. Metallihydroksidit muodostuvat ja adsorboivat kolloideja, kun metalli-ioneja lisätään veteen alle hydroksidien liukoisuusrajan. Kolloidien destabilointi tapahtuu varauksen neutraloinnin kautta, kun hydrolyysiyhdisteet adsorboituvat kolloidin pinnalle. Kun metalli-ionien pitoisuus vedessä ylittää hydroksidien liukoisuuden, alkavat metallihydroksidit saostua. (Jin, 2005)

Neljännessä ilmiössä hyödynnetään polymeerejä. Polymeerit ovat suuria kemiallisia yhdisteitä, jotka rakentuvat monista samanlaisista monomeereistä. Polymeerit sisältävät useita sähköisesti varautuneita kohtia, jos monomeeri on sähköisesti varautunut. Polymeerit voivat olla anionisia tai kationisia. Polymeeri kiinnittyy kolloidiin useista kohdista sekä yhtäaikaaisesti linkittää kolloideja toisiinsa. Polymeerin ja kolloidin välille syntyy ioni- ja vetysidoksia sekä van der Waalsin voimia. Polymeeri voi adsorboitua itsensä ympärille, jos se ei pääse kontaktiin

kolloidien kanssa. Tällöin partikkeli restabiloituu. Polymeeriannostelua ei saa ylimitoittaa, koska tällöin polymeerisegmentti kyllästyy kolloidin pintaan. Tämän seurauksena kolloidissa ei ole pinnalla vapaata tilaa kiinnittyä muihin kolloideihin, eli kolloidi on restabiloitu. Jäteveden saostuksessa käytetään kationisia polymeerejä, koska ne sitoutuvat tehokkaasti negatiivisesti varautuneisiin kolloideihin. Vastakkaisista varauksista johtuen polymeerillä ei tarvitse olla suurta molekyyliainemäärää toimiakseen tehokkaasti destabiloinnissa. Polymeerin käytöstä on monia hyötyjä saostamisessa: flokkulaationopeus kasvaa, flokkien koko ja kestävyys kasvaa ja laskeutumisaika pienenee. (Jin, 2005)

2.2 Flokkaus

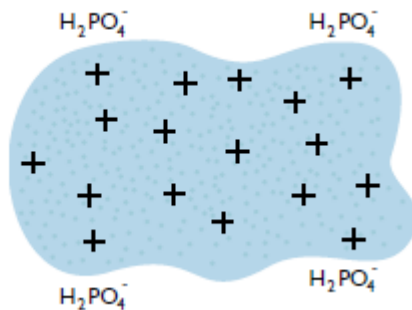
Flokkauksessa destabiloiduista partikkeleista muodostuu suurempia laskeutuvia flokkeja. Flokkausta tapahtuu, kun partikkelit liikkuvat vapaasti vedessä ja törmäävät toisiinsa sekä jo muodostuneisiin flokkeihin. Flokkien muodostamisessa on tärkeää, että flokkien koko ja kestävyys ovat tarpeeksi suuria. Flokkien tiheys kasvaa koon kasvaessa ja se vaihtelee välillä 1,02–1,1 kg/l. Flokkulaation kulkeutumismekanismeja on kaksi; perikineettinen ja ortokineettinen. (Gillberg, 2003)

Perikineettinen flokkulaatio perustuu satunnaiseen Brownin lämpöliikkeeseen eli partikkelien lämpöliikkeeseen ja sähköisiin vuorovaikutuksiin perustuvaan liikkeeseen. Mekanismin vaikutus ilmenee silloin, kun osa törmäävien partikkeleiden halkaisijoista on alle 1 µm. Ortokineettisessä flokkulaatiossa pienten partikkelien vaikutus flokkulaatioon on vähäinen, koska suuremmat partikkelit liittyvät toisiinsa helpommin. Perikineettisen flokkulaation merkitys on häviävän pieni verrattuna ortokineettiseen suuren hitauden vuoksi. (Jin, 2005)

Ortokineettisessä flokkulaatiossa systeemiin tuodaan ulkopuolista energiaa hämmennyksellä, jotta partikkelit liikkuisivat nopeammin ja näin ollen törmäisivät toisiinsa nopeammin. Jätevedenpuhdistamoilla hämmennys on harvoin käytössä, koska jäteveden virtaus riittää sekoitukseen. Flokkulaatiota tapahtuu, kun molemmat törmäävistä partikkeleista ovat halkaisijaltaan suurempia kuin 1 µm. (Jin, 2005)

Jätevedenpuhdistamoilla flokkien erotus tapahtuu tyypillisesti selkeytsaltaissa. Flokkien koon kasvaessa tarpeeksi suureksi ne laskeutuvat itsestään altaan pohjalle, koska niiden tiheys on suurempi kuin veden tiheys. Jos flokkien pintajännitys on kuitenkin liian suuri, eivät ne laskeudu vaikka tiheys olisikin suurempi kuin veden. Pintajännityksen merkitys pienenee flokkikoon kasvaessa, kun flokin pinta-alan suhde tilavuuteen pienenee. Suomen jätevedenpuhdistamoilla laskeutunut liete usein sakeutetaan jatkokäsittelyä varten. (Cheremisinof, 2002)

Flokkien muodostuminen on esitetty kuvissa 4 ja 5.



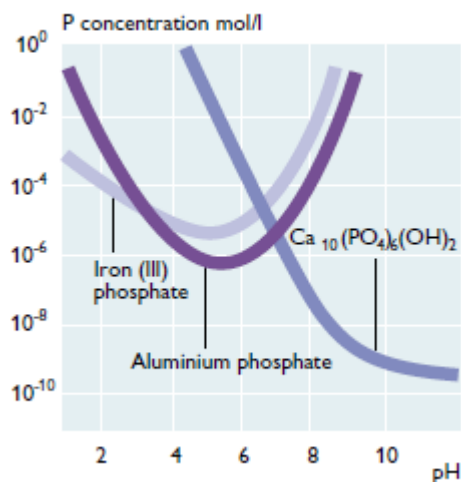
Kuva 4. Divetyfosfaattien adsorboituminen alumiinihydroksidiflokkiin. (Kemira, 2003)



Kuva 5. Flokkien muodostuminen. (Kemira, 2003)

2.3 Saostukseen käytetyt kemikaalit

Jäteveden saostamisessa voidaan käyttää rauta-, alumiini- ja kalsiumyhdisteitä. Kuvassa 6 on esitetty rauta-, alumiini- ja kalsiumfosfaattien liukoisuus pH:n funktiona. Kalsium on tehokkain saostaja, mutta vaatii emäksiset olosuhteet. Ferrirauta ja alumiini muodostavat lähes yhtä niukkaliukoisia fosfaatteja, mutta alumiini hieman tehokkaammin. (Clark, 1997)



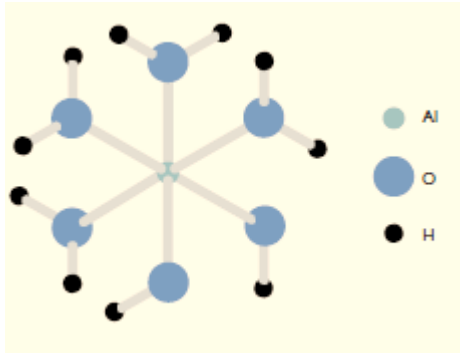
Kuva 6. Rauta-, alumiini ja kalsiumfosfaattien liukoisuudet pH:n funktiona. (Kemira, 2003)

2.3.1 Alumiinipohjaiset kemikaalit

Alumiinikemikaalit saostavat tehokkaasti fosforia, koska ne sitovat monipuolisesti eri fosforimuotoja. Alumiinihydroksidi adsorboi voimakkaasti fosforin kaikkia eri esiintymismuotoja. Nämä reaktiot ovat nopeita ja edistävät flokkien kasvunopeutta. Orgaanisen fosfaatin saostus onnistuu vasta hyvin happamissa olosuhteissa, kun pH on alle 3,6. (de-Bashan, 2004) (Clark, 1997)

Alumiinisaostuskemikaalit ovat useimmiten joko klorideja tai sulfaatteja. Veteen liuetessaan kemikaali dissosioituu ja alumiini-ionit ovat vapaita reagoimaan jäteveden kanssa. Alumiini reagoi veden kanssa nopeasti heksa-akva-alumiiniksi $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$. Kuvassa 7 on esitetty heksa-akva-alumiinin molekyyli rakenne. Tämän rakenteen ulkopuolella vesiliuoksessa 10–12 vesimolekyyliä on sitoutunut

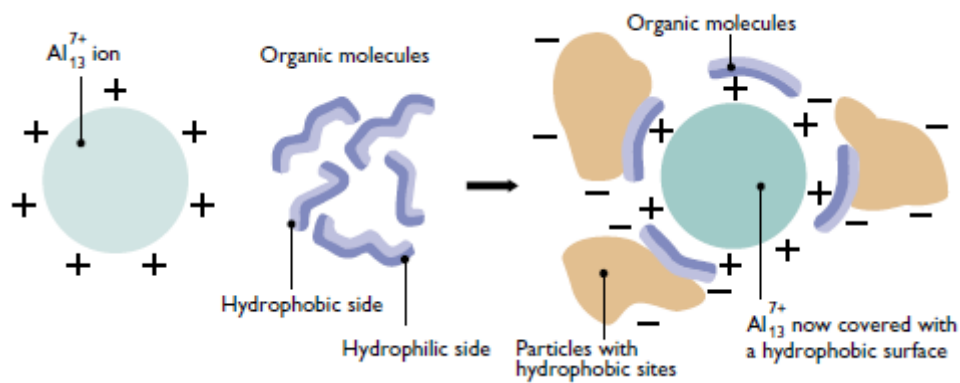
rakenteeseen, mutta heikommin kuin 6 vesimolekyyliä heksa-akva-alumiinissa. (Omoike, 1999)



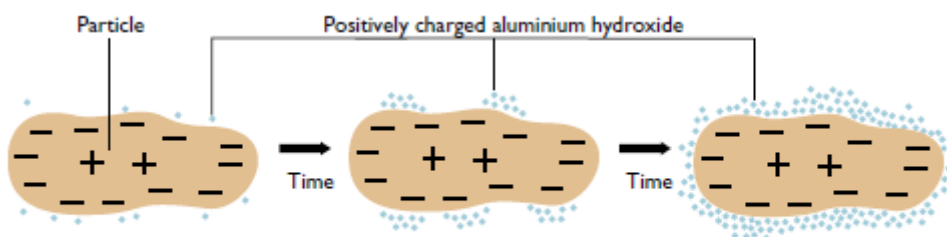
Kuva 7. Heksa-akva-alumiinin rakenne. (Kemira, 2003)

Jäteveden alkaliteettiin vaikuttavien karbonaatti- ja bikarbonaatti-ionien takia alumiini reagoi hydrolyyttisen reaktiosarjan kautta liukoiseksi monomeeriseksi, polymeeriseksi ja kiinteäksi alumiinihydroksidiksi $Al(OH)_3$ (Galarneau, 1996). Hydrolyyttisten reaktioiden tuotteen pituuteen vaikuttavat hydroksidi- ja alumiini-ionien moolisuhde, lämpötila, veden anionien pitoisuus ja jäteveden ikä. (Omoike, 1999)

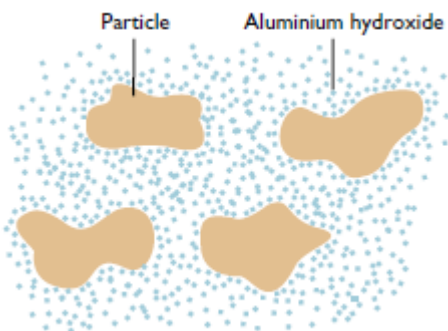
Kuvassa 8 on esitetty orgaanisten molekyylien sitoutuminen alumiini-ioniin. Negatiivisesti varautuneet orgaaniset molekyylit sitoutuvat voimakkaasti hydrofiiliseen alumiiniin, minkä takia alumiiniin muodostuu elektropositiivinen hydrofobinen alue. Tämä alue pystyy sitoutumaan jäteveden hydrofiilisiin partikkeleihin. Kuvasta 9 nähdään yleisesti jäteveden partikkeleiden sitoutuminen alumiinihydroksideihin ja kuinka niiden määrä kasvaa. Lopputulos näkyy kuvasta 10, jossa monia partikkeleita on sitoutunut yhdeksi flokiksi alumiinihydroksidien avulla. (Kemira, 2003)



Kuva 8. Orgaanisten molekyylien sitoutuminen alumiini-ioneihin. (Kemira, 2003)



Kuva 9. Kiinteiden partikkeleiden sitoutuminen alumiinihydroksidi-ioneihin ajan kuluessa. (Kemira, 2003)



Kuva 10. Alumiinihydroksidien ja jäteveden partikkeleiden muodostama flokki. (Kemira, 2003)

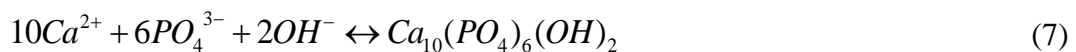
2.3.2 Rautapohjaiset kemikaalit

Rautakemikaaleja käytetään usein fosforin kemiallisessa saostuksessa, koska ne ovat huomattavasti edullisempia kuin alumiinikemikaalit. Rautakemikaalit voivat olla

joko ferro- tai ferrirautamuodossa eli kahden- tai kolmenarvoisia. Tavallisin ferrokemikaali on ferrosulfaatti $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, jota saadaan edullisesti, sillä sitä muodostuu sivutuotteena kemianteollisuudesta. Se on eniten käytetty jäteveden saostuskemikaali Suomessa. Tavallisin ferrikemikaali on ferrikloridi $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Ferrirautaa ei tarvitse hapettaa, toisinkuin ferrorautaa. Ferrikloridi parantaa veden erottuvuutta lietteestä ja nopeuttaa lietteen laskeutumista. (Thistleton, 2002)

2.3.3 Kalsiumpohjaiset kemikaalit

Kalsiumyhdisteet ovat selvästi harvemmin käytössä jätevedenpuhdistamoilla verrattuna rauta- ja alumiinikemikaaleihin. Kalsiumin optimisaostus-pH on 11, joka on hyvin korkea. Veden pH:n nostaminen tähän arvoon ei ole kannattavaa, sillä se tulisi laskea takaisin neutraaliksi ennen biologista prosessia. Jätevedenpuhdistamoilla on usein käytössä alkalointikemikaali, joka on Suomessa usein sammutettua kalkkia $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Alkalointikemikaalin tarkoituksena on kompensoida nitrifikaation alkaliteetin laskua, joka selitetään tarkemmin kappaleessa 3.3.1. Sammutettu kalkki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reagoi ortofosfaatin kanssa ja muodostaa helposti laskeutuvaa lietettä kaavan 7 mukaisesti. (Clark, 1997)



3. Biologinen puhdistusprosessi

Biologisen puhdistusprosessin tarkoituksena on poistaa jätevedestä ravinteita, flokata suspendoitunutta ja laskeutumatonta kolloidista kiintoainetta ja hapettaa liukoista biohajoavaa ainetta. (RIL, 124-2)

3.1 Mikrobin prosessit jätevedessä

Monenlaiset mikrobit pystyvät elämään jätevesissä, sillä jätevesi sisältää monipuolisesti erilaisia partikkeleita ja ravinteita. Jäteveden mikrobikanta koostuu lähinnä bakteereista, jotka hyödyntävät monipuolisesti jäteveden eri ravinteita. (RIL 124-2, 2004) Jäteveden bakteerit käyttävät liuennutta ja kolloidista orgaanista hiililähdettä kasvuunsa. Bakteerien solumassan tiheys on suurempi kuin veden, joten syntynyt biomassa saadaan laskeutettua. Keskimäärin bakteerien tiheys on noin 1,05 g/l eli tiheys jätevetteen on vain 0,05 g/l (Lee, 1994). Laskeutuvaan lietteeseen sitoutuu myös laskeutumatonta kiintoainetta. Typeä sitoutuu bakteerien kasvun myötä biomassaan, mutta suurin osa poistuu spesifien typenpoistobakteerien aineenvaihdunnan kautta. (Isoaho, 1986)

Biologiset prosessit voidaan toteuttaa joko sekoitusreaktoreihin, liikkuva-alusteisiin tai kiinteäalusteisiin. Sekoitusreaktoreita sekoitetaan jatkuvasti, jotta biomassa ei laskeudu vaan jätevesi pyritään pitämään tasaisesti sekoitettuna. Liikkuva-alusteisissa prosesseissa jäteveden seassa on vapaita biofilmin kasvualustoja. Jätevettä sekoitetaan, jotta kasvatusalustoja on tasaisesti jätevedessä. Kiinteäalusteisissa prosesseissa biologiset puhdistusreaktiot tapahtuvat biofilmeissä, jotka ovat muodostuneet kiinteään rakenteeseen. (Stuetz, 2009)

Biologiset hajoamisreaktiot ovat hyvin monimutkaisia ja sisältävät paljon sivureaktioita. Orgaanisen aineen hajoamisnopeuteen vaikuttaa kolme eri tapahtumaa. Ensin orgaanisen aineen ja hapen tulee adsorboitua vedestä bakteeriflokin pinnalle. Seuraavaksi orgaaninen molekyyli ja happi kulkeutuvat bakteerisolun sisälle ja viimeisenä vaiheena on itse hajotusreaktio. Adsorptiotapahtuman nopeus on niin suuri hyvin sekoitetuissa altaissa, ettei se rajoita hajoamista. Diffuusion nopeuteen

vaikuttavat orgaanisen aineen ja bakteeriflokin koko. Pienemmät partikkeli- ja flokkikoot nopeuttavat diffuusionopeutta. Aktiiviliete on yleensä voimakkaasti turbulenttinen, mikä takaa pienet partikkeli- ja flokkikoot. (Metcalf, 1991)

Merkittävimmät tekijät reaktionopeuksien kannalta ovat liukoisen hapen määrä, pH, jätevedessä esiintyvien mikrobien määrä ja laatu, lämpötila, jäteveden laatu, toksisten aineiden määrä ja laatu sekä partikkeli- ja bakteeriflokkikoot. Liukoisen hapen määrä vaikuttaa merkittävästi siihen mitkä bakteerit pystyvät lisääntymään jätevedessä. Hapellisia olosuhteita kutsutaan aerobisiksi, täysin hapettomia anaerobisiksi ja vapaan hapen puutetta anoksisiksi. (Isoaho, 1986)

Hapellisissa olosuhteissa bakteerit käyttävät liukoista happea ja hapettavat jäteveden orgaanista ainesta vedeksi ja hiilidioksidiksi. Samalla syntyy uutta biomassaa. Aerobiset prosessit ovat huomattavasti nopeampia kuin anaerobiset. Keskimäärin bakteerit tuottavat 0,5 kg biomassaa kuluttaessaan 1,0 kg COD:tä. Lämpötilan alentuminen jätevedessä heikentää hapettumisen reaktionopeutta, mutta tätä voidaan kompensoida kasvattamalla mikrobi- eli biomassan määrää jätevedessä säätämällä biomassan poistoa. (Kemira, 2003)

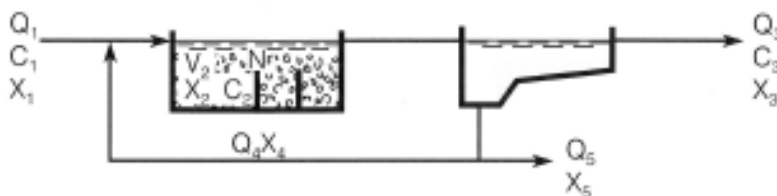
Hapettomissa olosuhteissa jätevedessä ei ole liukoista happea. Bakteerit hajottavat orgaanista ainesta metaaniksi, hiilidioksidiksi ja vedeksi. Osasta orgaanista ainetta tuotetaan lisää biomassaa. Biomassan tuotto on kuitenkin huomattavasti vähäisempää kuin hapellisissa olosuhteissa. Keskimäärin biomassaa syntyy 0,1 kg, kun bakteerit kuluttavat 1 kg COD:tä. Yleisesti anaerobisia reaktioita hyödynnetään jätevedenpuhdistusprosessissa lietteen mädätyksessä. Anaerobisia reaktioita voidaan nopeuttaa jäteveden lämpötilaa nostamalla. Lietteen mädätyksen lämpötila on Suomessa normaalisti 35 °C. (Kemira, 2003) (Sohlo, 2010)

Anoksisissa olosuhteissa ei ole saatavilla liukoista happea vaan pelkästään nitraattiin sitoutunutta happea. Orgaanisen aineen hajottamisprosessissa syntyy hiilidioksidia, vettä ja typpikaasua. Anoksisen hajoamisen reaktionopeus on huomattavasti suurempi kuin anaerobisen, mutta ei yhtä suuri kuin aerobisen. Biomassaa syntyy 0,5

kg bakteerien kuluttaessa 1,0 kg COD:tä. Tämä on sama määrä kuin hapellisissa olosuhteissa. Heterotrofiset bakteerit eivät pysty hyödyntämään veden hiilidioksidia biomassan kasvattamiseen, vaan ne tarvitsevat kasvuunsa jäteveden orgaanista ainetta. (Kemira, 2003)

3.2 Aktiivilieteprosessi

Suomessa jätevedenpuhdistamoilla typenpoistoon käytetään tyypillisesti aktiivilieteprosessia. Aktiivilieteprosessiin kuuluvat ilmastusallas ja selkeytysallas. Tarvittaessa ilmastusallas on jaettu hapellisiin ja anoksisiin lohkoihin, jotta saadaan ylläpidettyä typenpoistamiseen vaadittavia olosuhteita. Ilmastusaltaassa tapahtuu orgaaninen hajoaminen ja selkeytysaltaan tarkoituksena on erottaa biolietettä jätevedestä. Lietteen erottuminen perustuu lietteen ja veden tiheyseroon. Osa laskeutuvasta lietteestä palautetaan takaisin ilmastusaltaaseen ja kasvua vastaava osa poistetaan prosessista jatkokäsittelyyn. (Hakala, 1998) Kuvassa 14 on kuvattu aktiivilieteprosessin prosessikaavio.



Kuva 14. Aktiivilieteprosessi. (Henze, 2000)

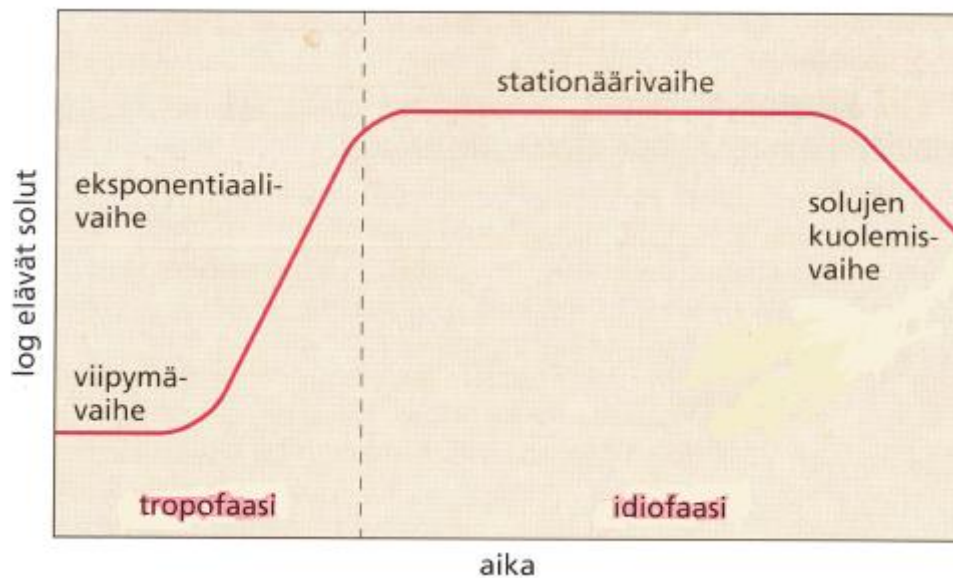
Aktiivilieteprosessin tehokkaan toiminnan kannalta on oleellista, että jätevesi on tasaisesti sekoitettua. Tällöin lietteen orgaaninen aines ja typpiyhdisteet ovat bakteereille paremmin saatavilla, mikä nopeuttaa hajotusreaktiota. Anoksisesta lohko sekoitetaan mekaanisella sekoittajalla ja hapelliset lohkot sekoittuvat syötettävän ilman avulla. Tyypillisesti ilma johdetaan jäteveteen altaan pohjalla olevilla ilmastimilla, mutta vaihtoehtoisia menetelmiä on monia. (Isoaho, 1986)

Aktiiviliete muodostuu lähinnä mikrobeista, jotka ovat pääosin bakteereja. Näiden lisäksi jätevesi sisältää alkueläimiä, rataselimiä ja matoja. Bakteerien esiintyvyys vaihtelee jäteveden koostumuksen mukaan. Hiilihydraattipitoisessa jätevedessä esiintyy paljon *Pseudomonas*-suvun bakteereja, kun vastaavasti proteiinipitoisessa jätevedessä esiintyy *Alcaligenes*, *Flavobacterium* ja *Bacillus* – sukuja. (Isoaho, 1986)

Bakteerit voidaan jakaa vapaasti uiviin, flokkeja muodostaviin ja rihmamaisiin. Hyvä laskeutuvuus on tärkeä ominaisuus aktiivilietelle, jotta se saadaan helposti selkeytysaltaassa erotettua vedestä. Rihmamaiset bakteerit heikentävät lietteen laskeutuvuutta, minkä takia suurina määrinä ne eivät ole toivottavia jätevedessä. Pieninä pitoisuuksina rihmamaiset bakteerit toimivat pitkäketjuisten polymeerien tavoin. Hyvin monet olosuhteet voivat saada aikaan rihmojen liikakasvua, kuten vääränlainen ravinnon ja biomassan suhde jätevedessä. (Hakala, 1998)

Vapaasti uivat bakteerit ovat yksittäisiä tai pariutuvia bakteerisoluja. Pienen kokonsa ansiosta ne voivat liikkua vapaasti jätevedessä. Nämä bakteerit lisääntyvät jätevedessä kaikista bakteereista nopeimmin, mutta toimivat monien muiden bakteerien ravintona. Vapaasti uivat bakteerit eivät sitoudu biomassaflokkiin, joten ne eivät laskeudu lietteen mukana selkeytysaltaassa. (Metcalf, 1991)

Jäteveden biomassa sisältää bakteerityypeiltään eniten flokkeja muodostavia bakteereja. Bakteerit muodostavat flokkeja tuottamiensa polymeerien avulla. Nämä polymeerit muodostuvat bakteerien hidastuvan kasvun aikana. Bakteerien kasvukäyrän eri vaiheet ajan funktiona on esitetty kuvassa 15. Flokkeja muodostavat bakteerit kasvavat hitaammin kuin vapaasti uivat. (Kemira, 2003)



Kuva 15. Solujen kasvukäyrä (Aittomäki *et al*, 2002)

Aktiivilietteen yksittäisten bakteerien kasvunopeutta on kuvattu kaavalla 8. Kaavassa otetaan huomioon bakteerien kasvu saatavilla olevan substraattipitoisuuden mukaan sekä bakteerien kuolemisnopeus. Kuvasta 15 on nähtävissä, että ajan kuluessa bakteerien kasvu pysähtyy stationäärivaiheessa ja tämän jälkeen elävien solujen määrä laskee eli soluja kuolee. (Metcalf, 1991)

$$\frac{dX}{dt} = \mu' \frac{S}{K_s + S} X - k_d X \quad (8)$$

X = lietepitoisuus MLSS (mixed liquor suspended solid)

μ' = spesifinen kasvunopeusvakio

S = substraattipitoisuus (BOD₇ tai COD)

K_s = Monodin vakio

k_d = spesifinen kuolemisnopeus

Bakteerin viipymäaikaa prosessissa tulee kasvattaa, jotta kasvu olisi stationäärivaiheessa. Viipymäaikaa kasvatetaan aktiivilieteprosessissa vähentämällä biolietteen poistoa systeemistä. Aktiivilietteen biomassassa sisältää elävien ja aktiivisten solujen lisäksi passiivisia ja kuolleita soluja. Vastaavasti bakteereille käyttökelpoisen

substraatin lisäksi jätevedessä on epäorgaanista ja inerttiä orgaanista ainetta, joita bakteerit eivät pysty hyödyntämään aineenvaihdunnassaan. Näiden biologisen puhdistusprosessin kannalta hyödyttömien komponenttien takia palautuskiertoa joudutaan pitämään suurempana, jotta prosessissa ylläpidetään haluttu määrä aktiivisia bakteereja ja niille sopivaa ravintoa. (Isoaho, 1986)

Mikrobit tarvitsevat kasvuunsa hydrolyysin kautta pilkottuja yksinkertaisia substraatteja. Jäteveden koostumus ja ominaisuudet vaihtelevat paljon vuorokausi- ja vuositasolla. Mikrobikannan tulee sopeutua monenlaisiin olosuhteisiin nopeasti. Jäteveden koostumuksen vaihtelua aiheuttavat etenkin hulevedet, jotka huippuvirtaamavuorokausina laimentavat tulevaa jätevettä. Tällöin ravinnekuorma pysyy samana, mutta pitoisuudet ja viipymät laskevat altaissa. (Henze, 2000)

Aktiivilieteprosessin toimivuuteen vaikuttavat monet eri tekijät. Näitä parametreja ovat lieteikä, lietekuorma, viipymäajat, happipitoisuus ja jäteveden koostumus. Lieteikä kuvaa biomassan viipymää ilmastusaltaissa ja se säädetään ylijäämälietteen pumppauksella. Lieteikää säädellään jäteveden tulevan kuormituksen ja lämpötilan mukaan. Lieteikä lasketaan kaavalla 9 ja lämpötilan mukainen säätely on esitetty kuvassa 16. (Stendahl, 1980)

$$SRT = \frac{V \cdot SS_a}{Q_{ex} \cdot SS_{ex} + Q \cdot SS_{ef}} \quad (9)$$

SRT = sludge retention time, lieteikä

V = ilmastusaltan tilavuus, m³

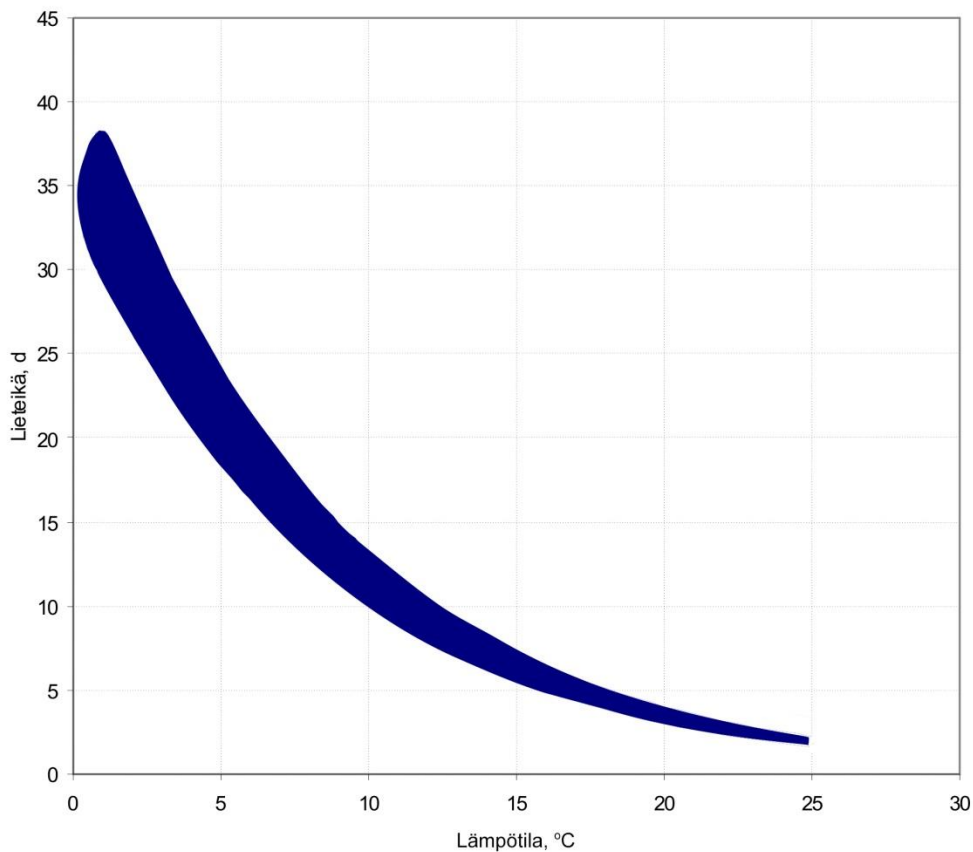
SS_a = kiintoainepitoisuus ilmastusaltaassa, kg SS/m³

Q_{ex} = ylijäämälietevirta, m³/d

SS_{ex} = ylijäämälietteen kiintoainepitoisuus, kgSS/m³

Q = ilmastusaltaasta lähtevän veden virtaama, m³/d

SS_{ef} = lähtevän jäteveden kiintoainepitoisuus, kg SS/m³



Kuva 16. Lämpötilan vaikutus lieteikään ja nitrifikaatiobakteerien toimintaan. (Kuva: Matti Valve julkaisussa Laitinen *et al*, 2014)

Lietekuorma kuvaa jäteveden orgaanisen aineen määrää suhteessa biomassan määrään aikayksikköä kohti. Tätä voidaan merkittävästi vähentää tehostamalla saostusta esiselkeytysaltaissa. Ilmastusaltaiden eri vaiheiden (hapellinen, anoksinen ja hapeton) viipymäajat vaikuttavat merkittävästi siihen, mitkä bakteerit kasvavat jätevedessä ja saavat kilpailuedun. Tämän takia altaiden eri vaiheiden happipitoisuutta on usein säädettävä, jotta typenpoiston kannalta merkittäville bakteereille luodaan suotuisat kasvuolosuhteet. Jäteveden koostumus eli eri ravinteiden konsentraatiot ja näiden suhteet vaikuttavat merkittävästi bakteerien kasvuun. Jäteveden koostumus muuttuu verkostosta tulevan kuorman mukaan ja sitä on vaikea säädellä. (Hakala, 1998)

3.3 Typenpoisto

Typpi on fosforin lisäksi toinen vesistöjä rehevöittävä ravinne. Ilmakehässä typpikaasua on 78 %. Se on hajuton, mauton, palamaton ja myrkytön kaasu. Näiden ominaisuuksien takia sitä käytetään inerttikaasuna. Ilmakehästä typpeä sitoutuu vesistöihin orgaanisiin yhdisteisiin pääasiassa syanobakteerien avulla. Orgaaninen typpi mineralisoituu ammoniakiksi ja tästä eteenpäin nitriitiksi ja nitraatiksi. Jätevesissä typpi esiintyy ammonium-, nitriitti- ja nitraattimuodoissa sekä ammoniakkinä ja proteiinien aminohapoissa. (Perttilä, 2003)

Ammoniakki on hyvin myrkyllinen kaasu vesistöissä etenkin kalalajeille. Nitriitti on epästabiili yhdiste, joka hapettuu helposti nitraatiksi. Nitriittiä syntyy välituotteena ammoniumin hapettuessa nitraatiksi. Nitraatti on typen hapettunein muoto. Tulevassa jätevedessä typpi on pääosin orgaanisena typpenä proteiineissa ja ureassa. Typpi voi esiintyä seitsemällä eri hapetusluvulla ja tämän takia se esiintyy monissa yhdisteissä. (Sohlo, 2010)

Heterotrofiset bakteerit hyödyntävät tulevan jäteveden orgaanista ainesta ja samalla typpi reagoi orgaanisesta tyypestä ammoniumiksi. Vesiliuoksessa ammoniumtyppi voi esiintyä myös ionisoimattomana ammoniakkinä. Tasapainoreaktio on esitetty kaavassa 10. Reaktion tasapaino on vasemmalla vesiliuoksen pH:n ollessa suurempi kuin 7,0. (Cheremisinoff, 1996)



3.3.1 Nitrifikaatio

Nitrifikaatiossa ammoniumtyypestä hapetetaan nitraattia. Ammoniumin osareaktiot nitriitin kautta nitraatiksi on esitetty kaavoissa 11 ja 12 sekä näiden kokonaisreaktio on kaavassa 13. Reaktiossa 11 syntyy vety-ioneja, jotka kuluttavat jäteveden alkaliteettiä. Happea kuluu 4,57 g O₂ / 1 g NH₄-N biologisessa typenpoistossa. (Ward, 2011)



Nitrifikaatioprosessin suorittavat *Nitrosomonas* ja *Nitrobacter* sukuihin kuuluvat bakteerit. *Nitrosomonas*-bakteerit hapettavat ammoniumtyppeä kaavan 11 mukaisesti ja *Nitrobacter*-suvun bakteerit hapettavat nitriitin kaavan 12 mukaisesti. Nämä suvut lasketaan autotrofeihin, koska ne hyödyntävät kasvuunsa epäorgaanisia typpi- ja hiiliyhdisteitä. Vastaavasti heterotrofiset bakteerit hyödyntävät orgaanisia komponentteja. Nitrifikaatiobakteerit vaativat tarkat kasvuolosuhteet toisin kuin heterotrofiset bakteerit, jotka sopeutuvat helposti erilaisiin olosuhteisiin. Nitrifikaation kannalta merkittävimmät tekijät ovat jäteveden lämpötila, pH, liukoisien hapen määrä, lieteikä, ammoniumtypen pitoisuus, orgaanisen aineen pitoisuus ja inhibiittoreiden pitoisuus. Nitrifikaatio tapahtuu pH-alueella 6,5–8,6. (Cheremisinoff, 1996)

Ammoniumtyppeä kuluu hapetusreaktioiden ohella myös biomassan kasvuun. Tämä reaktio on esitetty kaavassa 14. $C_5H_7NO_2$ kuvaa bakteerisolujen kemiallista rakennetta.

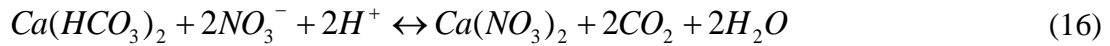


Yhdistämällä ammoniumin hapetusreaktio biomassan tuottoreaktion kanssa saadaan kokonaisreaktio, joka on esitetty kaavassa 15. (Isoaho, 1986)



Kokonaisreaktiossa syntyy vety-ioneja, jotka kuluttavat jäteveden alkaliteettia eli puskurointikykyä. Nitrifikaatiossa kuluu alkaliteettia 7,14 mg hapetettua NH_4^+ -N mg:a kohden. Alkaliteetin menetys pyritään tasaamaan alkalointikemikaalin syötöllä,

johon käytetään Suomessa jätevedenpuhdistamoilla usein kalkkiyhdisteitä. Kalsiumkarbonaatin ja nitraatti-ionien reaktio on esitetty kaavassa 16. (Metcalf, 1991)



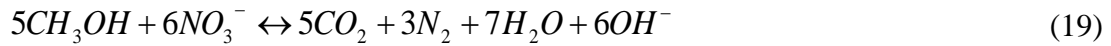
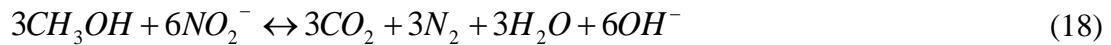
Autotrofiset nitrifikaatiobakteerit kasvavat selvästi hitaammin kuin heterotrofiset bakteerit. Hitaan kasvun lisäksi ne ovat myös herkkiä äkillisille muutoksille kasvuolosuhteissa. Tietyt raskasmetallit ja orgaaniset yhdisteet voivat inhiboida nitrifikaatiobakteereiden kasvun kokonaan. (Pagga, 2006)

3.3.2 Denitrifikaatio

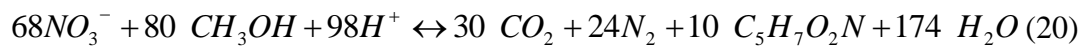
Denitrifikaatiossa bakteereilla ei ole käytettävissä vapaata liukoista happea vaan pelkästään nitraattiin sitoutunutta happea. Olosuhteita kutsutaan anoksisiksi. Bakteerit pelkistävät nitraatin typpikaasuksi ja lisäksi muodostuu pieniä määriä typpimonoksidia ja dityppioksidia. Nämä kaikki ovat kaasuja ja vapautuvat prosessista ilmaan. Denitrifikaatiobakteerit eivät ole autotrofeja, kuten nitrifikaatiobakteerit, vaan heterotrofisia. Useimmat denitrifikaatiobakteerit ovat joko *Bacillus denitrificans* -, *Micrococcus denitrificans* -, *Pseudomonas stutzeri* - tai *Achromobacter* -suvun bakteereita. (Isoaho, 1986)

Molekylaarisen hapen puutteesta johtuen bakteerit hyödyntävät nitraattia ja nitriittiä elektronin vastaanottajana hapetus- ja pelkistysreaktioissaan. Samalla bakteerit hapettavat orgaanista ainesta energiaksi. Jos prosessissa on saatavilla liukoista happea, hyödyntävät bakteerit happea orgaanisen aineen hapetusreaktiossa. Denitrifikaatio inhiboituu käytännössä liukoisen hapen pitoisuuden ylittäessä pitoisuuden 0,5 mg/l. (Metcalf, 1991)

Denitrifikaatio tapahtuu kahdessa eri vaiheessa, jotka on esitetty kaavoissa 17 ja 18. Metanoli kuvaa aktiivilietteen orgaanista ainesta. Reaktiovaiheet yhdistämällä saadaan kokonaisreaktio, joka on esitetty kaavassa 19. (Metcalf, 1991)



Yhdistämällä typenpoistoreaktiot samaan aikaan tapahtuvaan biomassan kasvuun saadaan kaavan 20 mukainen reaktio. (Metcalf, 1991)



Reaktiossa 20 kuluu vetyioneja, mikä kasvattaa veden alkaliteettia. Denitrifikaatioon vaikuttavat tekijät ovat nitraatin ja nitriitin pitoisuudet, pH, lämpötila ja hiililähteen pitoisuus sekä hiililähteen biohajoavuus. Denitrifikaatio tapahtuu pH-alueella 6-8 välissä. (Isoaho, 1986)

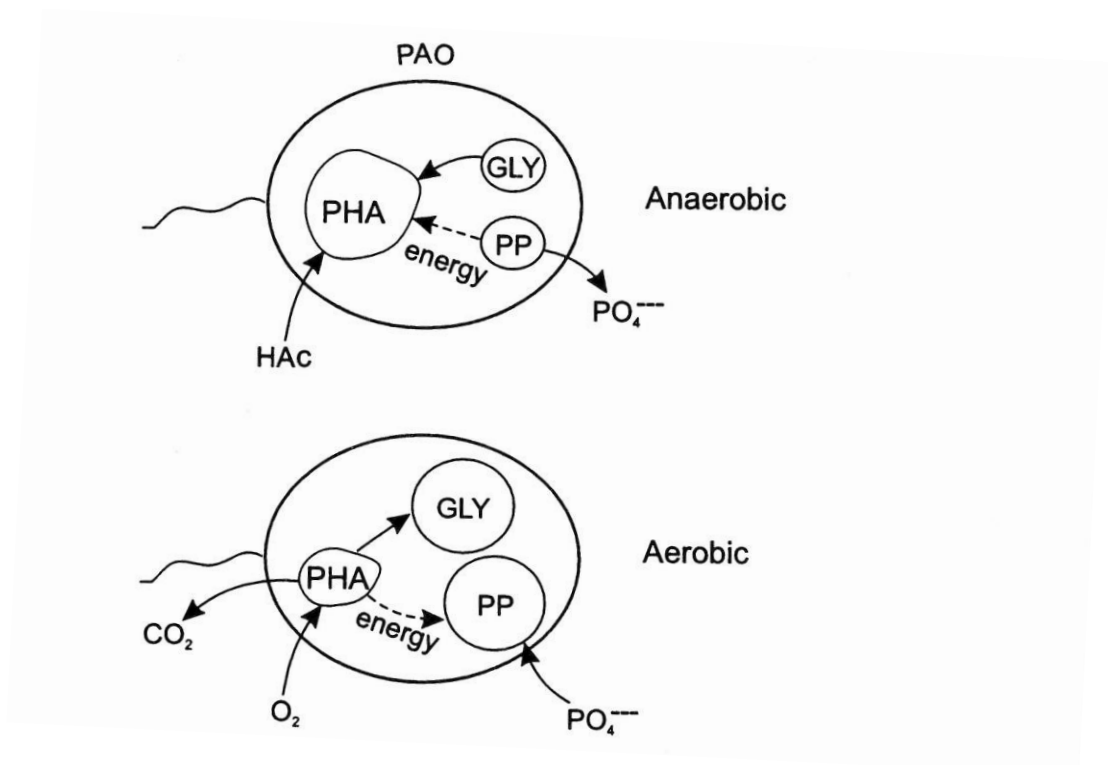
3.4 Fosforinpoisto biologisesti

Bakteerit tarvitsevat kasvuunsa erilaisia ravinteita, kuten fosforia, jota sitoutuu syntyvään solumassaan eli biomassaan. Fosforia sitoutuu siis aktiivilieteprosessissa biolietteeseen ilman erillisiä toimenpiteitä. Tämän lisäksi biologiseksi fosforinpoistoksi kutsutaan tiettyjen bakteerien kykyä sitoa fosforia itseensä yli oman energiatarpeen. Fosforin sitominen tapahtuu aerobisissa olosuhteissa ja vapautuminen anaerobisissa. Fosfori sitoutuu lietteeseen ja poistuu ylijäämalietteen mukana. PAO-bakteerit (polyphosphate accumulating organism) eli polyfosfaattia muodostavat organismit pystyvät poistamaan fosforia biologisesti. (Yuan, 2012)

Bakteereja räsitetään vuoroin hapellisissa ja hapettomissa olosuhteissa. Anaerobisessa tai anoksisessa vaiheessa mikrobit ottavat sisäänsä asetaattia ja propionaattia. Nämä varastoidaan solussa polyhydroksialkanoaateiksi PHA, jolloin kuluu hiilivarastoa. Varastoimiseen tarvitaan energiaa, jota vapautuu polyfosfaattien hajoamisesta. Tämän hajoamisen yhteydessä solusta vapautuu ortofosfaatti-ioneja.

Lievästi emäksisissä olosuhteissa pH:n ollessa 8-8,5 ortofosfaatit voivat reagoida metallikationien kanssa ja muodostaa saostuvaa metallifosfaattia. (Henze, 2000)

Aerobisissa olosuhteissa bakteerit kasvavat ja varastoivat vedestä ortofosfaatti-ioneja polyfosfaateiksi. Glykogeenivarastojen täydentämiseen tarvittava energia saadaan polyhydroksialkanoaattien PHA:n hapettamisesta. Mikrobit voivat myös hapettaa orgaanista ainesta, jolloin syntyy hiilidioksidia ja vettä. (Isoaho, 1986) Kuvassa 17 on esitetty bakteerien biologisen fosforinpoiston metaboliaa.



Kuva 17. Biologisen fosforinpoiston metabolia. (Henze, 2000)

4. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamo

Porvoon veden Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamo on otettu käyttöön vuonna 2001. Laitos on mitoitettu 38 600 asukkaan jätevesille (AV-luku). Tämä vastaa 2 700 kg/d BOD-kuormaa. Käsitellyt jätevedet johdetaan puhdistamolta Svartbäckinselälle Suomenlahteen. Tulevat jätevedet johdetaan puhdistamolle kahden pääpumppaamon sekä kolmen pienen pumppaamon kautta. (Niemelä, 1999)

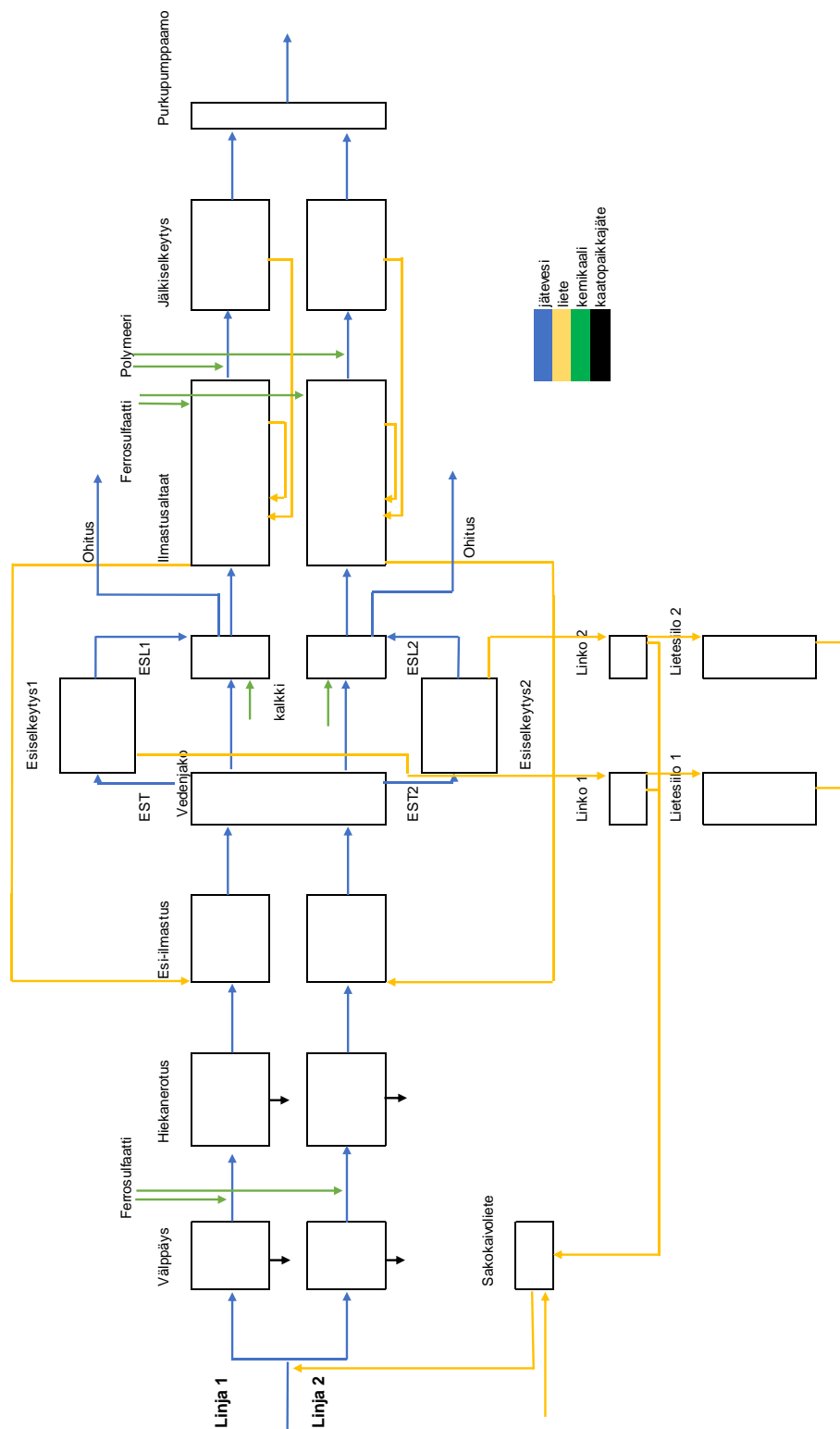
4.1 Yleistä

Puhdistamon nykyiset lupaehdot ovat olleet voimassa vuoden 2007 alusta alkaen. Ehdot perustuvat Vaasan hallinto-oikeuden päätökseen 13.9.2005 Nro 24/2005/1 Dnro LSY-2004-Y-37. Lupaehdot on esitetty taulukossa 1. Jätevedenpuhdistamon toimintaa tarkkaillaan 29.2.2008 päivitetyn Uudenmaan ympäristökeskuksen hyväksymän tarkkailuohjelman mukaisesti. (VaHaO, 2005) Uusi ympäristölupa astuu voimaan arviolta 2014-2015.

Käsitelty jätevesi täyttää lupaehtojen vaatimukset, mutta huippuvirtaamakausien aikana lupaehtoisissa esitetyt pitoisuudet ylittyvät ja poistotehot alittuvat. Maksimivirtaamat esiintyvät tyypillisesti runsaslumisten vuosien kevään sulamisjaksolla. Myös loppusyksyn sadejaksot myös nostavat puhdistamon keskimääräistä virtaamaa. Maksimivirtaama voi olla jopa 40 000 m³/d. Porvoon kaupungissa on noin 11 km sekaviemäröintiverkostoa, minkä takia hulevesiä pääsee tavanomaista enemmän viemäriverkoston kautta jätevedenpuhdistamolle. Lumien sulamispäivinä ja sadepäivinä Hermanninsaaren puhdistamon tulevan jäteveden virtaama kasvaa huomattavasti näiden hulevesien takia. Aktiivilieteprosessin kapasiteetti ei ole riittävä yli 1000 m³/h:n virtaamalle ja tämän ylittyessä jätevesi johdetaan esiselkeytyksen jälkeen biologisen puhdistusprosessin ohi vesistöön.

4.2 Prosessin kuvaus

Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla jätevesi puhdistetaan mekaanisesti, kemiallisesti ja biologisesti. Kemiallisena puhdistusmenetelmänä käytetään saostusta ja biologisena aktiivilieteprosessia. Prosessin lohkokaavio on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Hermanninsaaren prosessin lohkokaavio.

Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon puhdistusprosessi alkaa porraskäyryllä. Jätevedestä erotetaan karkein kiintoaine säveliltiltään 3 mm:n käyryllä. Erotetusta käyryestä puristetaan ylimääräinen vesi pois ja kuivattuna se johdetaan käyrylälle. Puristetun käyryen kuiva-ainepitoisuus on noin 40–50 % ja sitä syntyy keskimäärin 0,3 m³/d. Käyryksen jälkeen jätevesi johdetaan hiekanerotukseen.

Hiekanerotusaltaan pohjalta pumpataan hiekka-vesi-seosta hiekkalajittimelle, jossa on ruuvierotin. Erotettu hiekka johdetaan käyrylälle ja vesi takaisin puhdistusprosessin alkuun. Hiekka erotetaan jätevedestä, koska se rikkoo herkästi puhdistusprosessin laitteita, erityisesti pumppuja. Hiekkaa kertyy keskimäärin 0,2 m³/d. (Niemelä, 1999)

Sakokaivolietteet esikäsitellään käyryllä ennen kuin ne johdetaan puhdistusprosessin alkuun. Sakokaivolietettä tuodaan imuautoilla noin 100–200 m³/d. Erotettu käyry johdetaan omalle käyrylälle.

Esi-ilmastuksen tarkoituksena on kunnostaa jätevettä, sillä viemäriverkostossa jätevesi on usein hapettomissa olosuhteissa. Ilma syötetään altaan pohjalta ja se tuotetaan samoilla ilmastuskompressoreilla kuin hiekanerotukseen ja biologisen puhdistuksen ilmastusaltaisiin johdettava ilma. Esi-ilmastuksen ilmantarve on noin 400 n-m³/h. (Niemelä, 1999)

Vedenjakoaltaan tarkoituksena on säädellä esiselkeytetyn veden ja suoraan ilmastusaltaalle menevän veden määrien suhteita. Osa jätevedestä johdetaan suoraan ilmastukseen denitrifikaatioprosessin hiililähteen riittävyyden turvaamiseksi. Esiselkeytetty vesi johdetaan ilmastukseen tai huippuvirtaamatilanteissa vesistöön. Ajoapaa säädellään vedenjakoaltaan luukuilla. Mitoitusvirtaamapäivinä esiselkeytetyn veden osuus on 30–50 % ja suoraan ilmastukseen johdettavan jäteveden osuus on 50–70 %. Esiselkeytysaltaissa pohjalle laskeutuu sekalietettä, jota varastoidaan lietetaskuissa.

Ilmastusaltaat ovat suorakaiteen muotoisia tulppavirtausaltaita. Altaat on jaettu väliseinillä kahdeksaan eri lohkokoon. Taulukossa 2 näkyvät eri lohkojen prosessitilavaihtoehdot. Lohko 8 on nitraatin kierrätyslietepumppausallas. Lohkojen olosuhteita säädellään typenpoiston mahdollisimman optimaalisten olosuhteiden ylläpitämiseksi. (Niemelä, 1999)

Taulukko 2. Ilmastusaltaan lohkojen prosessitilat. (Niemelä, 1999)

| Lohko nro | Prosessitila | Tilavuus m ³ |
|--------------|----------------------|----------------------------|
| 1 | anaerobi/anoksinen | 300 |
| 2 | anaerobi/anoksinen | 300 |
| 3 | anoksinen | 300 |
| 4 | anoksinen/hapellinen | 300 |
| 5 | anoksinen/hapellinen | 300 |
| 6 | hapellinen | 700 |
| 7 | hapellinen | 700 |
| 8 | deoksinen | 100 |

Lohkojen 4-7 pohjalla on kalvoilmastimet, joille ilma tuotetaan kompressoreilla. Hapentarve mitoitetaan ilmastukseen tulevan BOD-kuorman avulla. Tarvittava ilmamäärä on mitoitustilanteessa noin 4600 n-m³/h. Lohkoissa 1-5 ja 8 on mekaaniset sekoittimet lietteen laskeutumisen estämiseksi. (Niemelä, 1999)

Ilmastusaltaiden jälkeen jätevesi johdetaan jälkiselkeytysaltaille, joissa jätevesi ja liete erotetaan toisistaan. Käsitelty jätevesi johdetaan vesistöön ja laskeutunut liete pumpataan takaisin ilmastusaltaaseen lietekartiosta altaan pohjalta. (Niemelä, 1999)

Ylijäämäliete pumpataan molemmista ilmastusaltaista esi-ilmastusaltaaseen tai esiselkeytykseen johtavaan kaivoon. Bioliete laskeutuu raakalietteen kanssa esiselkeytysaltaan pohjalle. Altaiden pohjalla on 55 m³:n lietekartiot, joissa sekaliete sakeutuu. Sakeutuneen lietteen kuiva-ainepitoisuus on noin 3 m-%. Tämä liete johdetaan lingoille veden erotukseen, jonka jälkeen lietteen kuiva-ainepitoisuus on noin 20 m-%. Kuivattua lietettä syntyy vuodessa noin 5200 m³ ja se kuljetetaan palveluntarjoajan biokaasulaitokselle jatkokäsittelyyn ja edelleen

maanparannusaineeksi. Lietteen kuivauksessa erottuu rejektivettä, joka johdetaan sakokaivolietteen vastaanoton kautta prosessin alkuun. (Kuokkanen, 2013)

Puhdistusprosessissa käytetään kolmea eri kemikaalia: kidevedellistä ferrosulfaattia $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, sammutettua kalkkia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ja kationista polyakryyliamidia (polymeeri). Ferrosulfaatti toimii fosforin saostuskemikaalina.

Ferrosulfaatti syötetään prosessiin välppien jälkeen ja ilmastusaltaan 7. lohkon. Rinnakkaissaostuksen tarkoituksena on viimeistellä jälkiselkeytysaltaassa fosforin poisto. Ferrosulfaatti tuodaan laitokselle kiinteänä ja se liuotetaan ennen annostelua.

Kalkkia käytetään pH:n säätökemikaalina. Kalkilla kompensoidaan nitrifikaation kuluttamaa alkaliteetin ja ferrosulfaatin aiheuttamaa pH:n laskua. Erityisesti biologinen prosessi on herkkä liian alhaiselle tai korkealle pH-arvolle.

Polymeeriä annostellaan sekalietteen joukkoon lietteen kuivauksessa. Polymeeri tuodaan laitokselle kiinteänä ja se liuotetaan, jonka jälkeen se laimennetaan pitoisuuteen 0,1 m-%. Polymeeriä annostellaan myös jälkiselkeytykseen johdettavaan jäteveeteen, jotta liete laskeutuisi altaassa paremmin.

4.3 Puhdistusprosessin ajotavat

Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon prosessia voidaan ohjata vedenjaon luukuilla kolmeen eri ajotapaan. Ensimmäisellä ajotavalla jätevesi johdetaan esiselkeytyksen kautta. Tätä ajotapaa kutsutaan ”rinnakkaissaostukseksi”.

Toinen ajotapa on ”biologinen ravinteidenpoisto”, jolloin 50–70 % tulevasta jätevedestä johdetaan suoraan ilmastusaltaisiin. Esiselkeytyksen ohituksen tarkoituksena on varmistaa typenpoistoreaktioiden hiililähteen riittävyys. Tämä ajotapa on Hermanninsaareissa käytössä poikkeustilanteita lukuun ottamatta.

”Tehostetussa kemiallisessa käsittelyssä” esiselkeytykseen johdettavaan veteen syötetään tehokasta lisäsaostuskemikaalia ja esiselkeytetty vesi johdetaan suoraan

vesistöön. Tämä ajotapa on suunniteltu käytettäväksi huippuvirtaamavuorokausien aikana. Tämän takia sitä kutsutaan myös ”tulva”-ajotavaksi. Hulevedet laimentavat tulevan jäteveden ravinnepitoisuuksia, eikä ilmastusaltaiden kapasiteetti riitä käsittelemään koko tulevaa virtamaa. Tällöin osa jätevedestä johdetaan biologisen prosessin ohi. Taulukossa 3 on esitetty esiselkeytetyn veden tulokset kolmelle eri käyttötilanteelle.

Taulukko 3. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon käyttötilanteet ja niiden poistotehot ennen biologista käsittelyä (Niemelä, 1999)

| Käyttötilanne | Reduktio % | |
|----------------------------------|------------|------------|
| | BOD7 | Kiintoaine |
| Rinnakkaissaostus | 45 | 60 |
| Biologinen ravinteidenpoisto | 35 | 50 |
| Tehostettu kemiallinen käsittely | 80 | 90 |

Biologista prosessia voidaan säätää muuttamalla ilmastusaltaiden lohkojen prosessitiloja taulukon 2 mukaisesti. Prosessitilat säädetään ilmansyötön sekä kierrätysliete- ja palautuslietesäätöjen avulla.

4.4 Puhdistustulokset

Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolta otetaan velvoitetarkkailunäytteet tulevasta, esiselkeytetystä ja lähtevästä jätevedestä sekä ilmastusaltaasta kahden viikon välein.

Vesistöön johdettavan jäteveden lupaehtojen täyttymistä tarkkaillaan vuosineljänneskeskiarvoina. Vain typenpoistoa tarkkaillaan vuosikeskiarvona. Suurimmat hulevesivirtaamat ajoittuvat keväälle lumien sulamisen eli toisen vuosineljänneksen aikaan. Loppusyksyn sadekaudekset aiheuttavat myös virtaamamäärän kasvua, joiden seurauksena syntyy ohitusvesiä. Mahdollisesti kiristyvän lupaehdon takia ohitusvesien puhdistuksen tehostamista on tutkittu tässä diplomityössä. Taulukossa 4 on esitetty vuoden 2012 ja taulukossa 5 vuoden 2013 tulevan jäteveden virtaamat ja ohitusvesien määrä. Vuosien 2012 ja 2013 talvet olivat hyvin lumisia, minkä takia sulamisvedet ovat vaikuttaneet virtaamamääriin.

Taulukko 4. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon tulevan jäteveden virtaamat ja ohitukset vuonna 2012. (Kuokkanen, 2013)

| Kuukausi | Tuleva jätevesi | | | | | Ohitus | | |
|-----------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------|
| | minimi m ³ /d | keskiarvo m ³ /d | maksimi m ³ /d | yhteensä m ³ | maksimi m ³ /h | verkosto m ³ | esikäsitt. m ³ | kok. ohitus % |
| Tammikuu | 11027 | 15136 | 22763 | 469215 | 1153 | 9719 | 505 | 1.4 |
| Helmikuu | 8644 | 9705 | 11576 | 281443 | 836 | | | |
| Maaliskuu | 9282 | 16016 | 31979 | 496484 | 1572 | | 37804 | 4.2 |
| Huhtikuu | 16108 | 22904 | 33205 | 687122 | 1484 | 1663 | 141043 | 17.2 |
| Toukokuu | 10769 | 15233 | 29197 | 472209 | 1452 | 1939 | 19988 | 3.1 |
| Kesäkuu | 7728 | 10732 | 18702 | 321969 | 1341 | 533 | 1793 | 0.5 |
| Heinäkuu | 7958 | 9292 | 13700 | 288060 | 1237 | 303 | 499 | 0.3 |
| Elokuu | 7647 | 8503 | 12043 | 263604 | 1026 | | | |
| Syyskuu | 8195 | 13005 | 35337 | 390136 | 1834 | 2104 | 16885 | 2.2 |
| Lokakuu | 12878 | 16942 | 24837 | 525192 | 1463 | | 7126 | 1.1 |
| Marraskuu | 12007 | 16268 | 31692 | 488052 | 1499 | | 9395 | 1.1 |
| Joulukuu | 8550 | 10103 | 11572 | 313203 | 584 | 50 | | 0.0 |
| Vuosi | 7647 | 13652 | 35337 | 4996689 | 1834 | 16311 | 235038 | 2.6 |

Taulukko 5. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon tulevan jäteveden virtaamat ja ohitukset vuonna 2013. (Kuokkanen, 2014)

| Kuukausi | Tuleva jätevesi | | | | | Ohitus | | |
|-----------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------|
| | minimi m ³ /d | keskiarvo m ³ /d | maksimi m ³ /d | yhteensä m ³ | maksimi m ³ /h | verkosto m ³ | esikäsitt. m ³ | kok. ohitus % |
| Tammikuu | 8042 | 12523 | 27356 | 388210 | 1355 | 2126 | 5106 | 0.9 |
| Helmikuu | 8282 | 8898 | 9754 | 249149 | 526 | | | |
| Maaliskuu | 8047 | 8620 | 9445 | 267210 | 503 | | | |
| Huhtikuu | 8860 | 19178 | 36916 | 575329 | 1722 | 302 | 66687 | 7.2 |
| Toukokuu | 10880 | 12541 | 16872 | 388758 | 1552 | 965 | 2427 | 0.8 |
| Kesäkuu | 7474 | 9515 | 12643 | 285457 | 966 | | 499 | 0.2 |
| Heinäkuu | 6900 | 7745 | 8622 | 240109 | 703 | 10 | 40 | 0.0 |
| Elokuu | 7332 | 10166 | 18421 | 315137 | 1403 | 1469 | 2725 | 1.0 |
| Syyskuu | 7638 | 8347 | 8974 | 250408 | 591 | | | |
| Lokakuu | 7478 | 9434 | 19378 | 292441 | 1332 | | 567 | 0.1 |
| Marraskuu | 12575 | 16946 | 26760 | 508376 | 1458 | 7 | 21292 | 3.3 |
| Joulukuu | 11043 | 13115 | 17193 | 406553 | 848 | | 663 | 0.1 |
| Vuosi | 6900 | 11417 | 36916 | 4167137 | 1722 | 4879 | 100006 | 1.1 |

Ohitusvedet heikentävät vesistöön lähtevän veden puhdistustuloksia. Vesistöön johdettavan jäteveden tulokset lasketaan koko prosessin läpikäyneestä lähtevästä jätevedestä ja ohitusvesistä painotettuina keskiarvoina. Ohitusvedet nostavat vesistöön lähtevän veden ravinne- ja kiintoainepitoisuuksia. Taulukoissa 6 ja 7 on esitetty vuosien 2012 ja 2013 vuosineljännesten tulokset BOD:lle, kokonaistypelle ja kokonaisfosforille sekä kiintoaineelle. Taulukoissa käsitellyllä jätevedellä

tarkoitetaan koko puhdistusprosessin läpikäynyttä jätevettä ja vesistöön lähtevään jäteveteen on otettu huomioon myös ohitusvedet.

Taulukko 6. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon puhdistustulokset vuosineljänneksittäin vuonna 2012. (Kuokkanen, 2013)

| Parametri | Laatu | I/ 2012 | II/ 2012 | III/ 2012 | IV/ 2012 | lupaehdot |
|-----------------------------|-------|------------|-------------|--------------|-------------|-----------|
| BOD₇(atu) | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 2,8 | 2,1 | 2,2 | 2,6 | |
| | % | 99 | 99 | 99 | 99 | |
| - vesistöön | mg/l | 5,0 | 7,8 | 3,2 | 3,3 | ≤ 10 |
| | % | 98 | 97 | 99 | 99 | ≥ 95 |
| COD_{Cr} | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 29 | 21 | 26 | 29 | |
| | % | 93 | 96 | 96 | 95 | |
| - vesistöön | mg/l | 34 | 36 | 28 | 31 | ≤ 60 |
| | % | 92 | 93 | 96 | 95 | ≥ 90 |
| Kok. fosfori | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 0,14 | 0,17 | 0,13 | 0,19 | |
| | % | 97 | 98 | 99 | 98 | |
| - vesistöön | mg/l | 0,20 | 0,44 | 0,17 | 0,21 | ≤ 0,5 |
| | % | 96 | 94 | 98 | 98 | ≥ 93 |
| Kok. typpi | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 14 | 6,7 | 10 | 8,6 | 9,7 |
| | % | 71 | 85 | 84 | 83 | |
| | % | 80 | | | | |
| - vesistöön | mg/l | 14 | 8,4 | 10 | 8,7 | 10 |
| | % | 69 | 79 | 83 | 82 | |
| | % | 78 | | | | ≥ 70 |
| Ammoniumtyppi | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 2,0 | 0,6 | 0,15 | 0,12 | |
| | % | 96 | 99 | 99,8 | 99,8 | 98 |
| - vesistöön | mg/l | 2,6 | 2,4 | 0,48 | 0,34 | |
| Kiintoaine | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 6,1 | 3,7 | 4,5 | 3,8 | |
| | % | 98 | 99 | 99 | 99 | |
| - vesistöön | mg/l | 9,1 | 16 | 6,3 | 5,0 | 35 |
| | % | 96 | 95 | 99 | 99 | 90 |

Taulukko 7. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon puhdistustulokset vuosineljänneksittäin vuonna 2013. (Kuokkanen, 2014)

| Parametri | Laatu | I/ 2013 | II/ 2013 | III/ 2013 | IV/ 2013 | lupaehdot |
|-----------------------------|-------|------------|-------------|--------------|-------------|-----------|
| BOD₇(atu) | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 3,4 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | |
| | % | 99 | 99 | 99 | 99 | |
| - vesistöön | mg/l | 4,3 | 7,8 | 3,4 | 3,7 | ≤ 10 |
| | % | 98 | 97 | 99 | 99 | ≥ 95 |
| COD_{Cr} | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 31 | 30 | 27 | 29 | |
| | % | 96 | 95 | 96 | 95 | |
| - vesistöön | mg/l | 33 | 42 | 28 | 31 | ≤ 60 |
| | % | 95 | 93 | 95 | 95 | ≥ 90 |
| Kok. fosfori | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 0,28 | 0,16 | 0,13 | 0,14 | |
| | % | 97 | 98 | 99 | 98 | |
| - vesistöön | mg/l | 0,31 | 0,33 | 0,15 | 0,17 | ≤ 0,5 |
| | % | 97 | 96 | 98 | 98 | ≥ 93 |
| Kok. typpi | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 12 | 8,1 | 12 | 15 | |
| | % | 83 | 84 | 80 | 70 | |
| | % | 79 | | | | |
| - vesistöön | mg/l | 12 | 8,9 | 12 | 15 | |
| | % | 82 | 81 | 79 | 70 | |
| | % | 78 | | | | ≥ 70 |
| Ammoniumtyppi | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 0,20 | 1,1 | 1,5 | 5,2 | |
| | % | 99,7 | 98 | 98 | 89 | |
| - vesistöön | mg/l | 0,37 | 2,0 | 1,7 | 5,5 | |
| Kiintoaine | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 6,7 | 3,9 | 4,2 | 3,5 | |
| | % | 99 | 99 | 99 | 99 | |
| - vesistöön | mg/l | 8,2 | 14 | 5,1 | 4,9 | 35 |
| | % | 98 | 97 | 99 | 99 | 90 |

Vuonna 2013 fosforin heikompi puhdistustulos käsitellyssä jätevedessä ensimmäisen vuosineljänneksen aikana sekä vähäiset ohitusvesimäärät aiheuttivat fosforin pitoisuuden nousun yli pitoisuustason 0,3 mg/l. Toisen vuosineljänneksen aikana käsitellyn jäteveden fosforitulokset palautuivat normaalille tasolle. Kuitenkin ohitusvesien takia vesistöön lähtevän veden pitoisuus nousi yli pitoisuustason 0,3 mg/l.

Vuonna 2012 fosforitulokset ylittivät pitoisuuden 0,3 mg/l vain toisen vuosineljänneksen aikana, vaikka 2012 oli runsaslumisempi talvi. Suurien ohitusmäärien vuoksi fosforin pitoisuus toisen vuosineljänneksen aikana oli 0,44 mg/l. Vesistöön lähtevän jäteveden fosforipitoisuus oli siis yli kaksi kertaa suurempi

kuin käsitellyn jäteveden. Jos puhdistamon lupaehtoja kiristetään siten, että fosforin pitoisuudelle asetetaan raja-arvoksi 0,3 mg/l, ei vuosina 2012 ja 2013 saavutettu puhdistustaso olisi riittänyt.

KOKEELLINEN OSUUS

5. Laboratoriosaostuskokeet

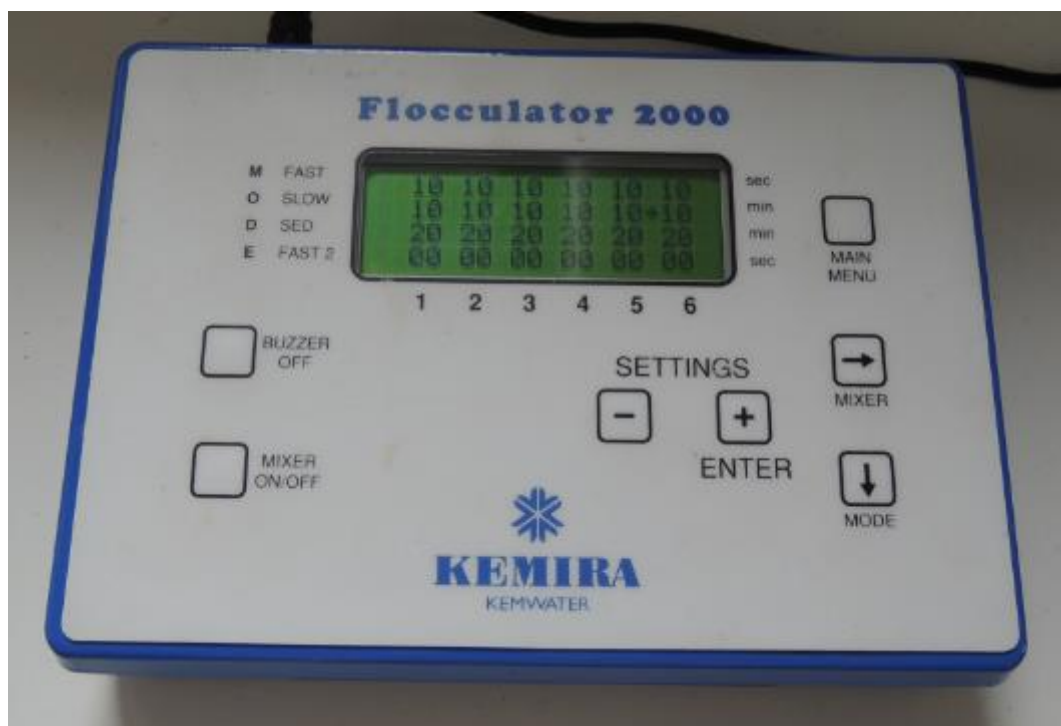
Tässä luvussa on esitetty kemiallisten laboratoriosaostuskokeiden menetelmät, tulokset ja johtopäätökset.

5.1 Laboratoriosaostuskokeiden menetelmät

Kesällä 2013 esisaostusta tutkittiin laboratoriomittakaavassa flokkulaattoreilla. Kokeissa vertailtiin neljää eri saostuskemikaalia. Käytetyt kemikaalit olivat Kemiran PAX-XL100, PAX-XL60, PIX-105 ja ALF-30. PAX-liuokset ovat erivahvuisia polyalumiinikloridiliuoksia. Pitoisuudet ovat 9,3 m-% (PAX-XL100) ja 7,5 m-% (PAX-XL60). PIX-105 on ferrisulfaattiliuos, jonka pitoisuus on 11,2 m-%. ALF-30 on kiinteä alumiini- ja ferrosulfaatin seos, jossa aktiivisten ionien (Al^{3+} , Fe^{3+}) määrä on 10,7 m-%. Kemikaalien tuote-esittelyt ovat liitteissä 3-6.

Saostuskokeissa käytettiin yhden litran flokkulaattoriastioita, joita oli käytössä kuusi yhtä aikaa rinnakkaiskokeessa. Flokkulaattoreihin annosteltiin litra tulevaa jätevettä ja haluttu kemikaalimäärä. Heti kemikaalin annostelun jälkeen sekoitus laitettiin päälle. Sekoitusnopeudet pidettiin vakiona kaikkien kokeiden ajan. Saostuskokeista analysoitiin pH ja kokonaisfosfori. Kokeissa käytetty jätevesi haettiin samana päivänä vedenjakoaltaasta. Vedenjakoaltaan vesi oli mekaanisesti puhdistettua tulevaa jätevettä eli sen fosforipitoisuus oli keskimäärin sama kuin tulevassa jätevedessä. Näytteiden fosforipitoisuudet vaihtelivat välillä 6-9 mg/l.

Flokkulaattorina käytettiin Kemiran Flocculatr 2000 -mallia. Kuvassa 19 on flokkulaattorilaite. Siihen säädettiin 10 sekunnin pikasekoitus, 10 minuutin hämmennys ja 20 minuutin laskeutus. Pikasekoituksen sekoitusnopeus oli 400 rpm ja hämmennyksen 40 rpm. Kuvassa 20 on saostuskokeiden koejärjestely. Jokaisessa kuudessa dekantterilasissa on oma sekoittaja.



Kuva 19. Laboratoriosaostuskokeissa käytetty flokkulaattorilaite.



Kuva 20. Saostuskokeiden suoritus flokkulaattoreilla.

Fosforin analysointi tapahtui Langen LCK 349 kokonaisfosforin määrittelykseen tarkoitetuilla kyvettitesteillä. Jätevesinäytettä pipetoitiin kyvetteihin, joiden pohjalla oli rikkihappoa. Hapon tarkoituksena oli liuottaa kiinteä fosfori liukoiseksi. Kyvettejä lämmitettiin uunissa 100°C uunissa tunnin ajan. Uunina käytettiin Langen LT 200 -mallia. Kyvettitestit perustuvat fosfaatti-ionien reaktioon molybdaatin ja antimonin kanssa happamassa liuoksessa. Reaktiossa syntyy antimonyylifosfaattimolybdaattikompleksi, joka pelkistetään askorbiinihapon avulla fosfomolybdeenin siniseksi. Kokonaisfosforin mittausta suoritettiin fotometrillä, jonka

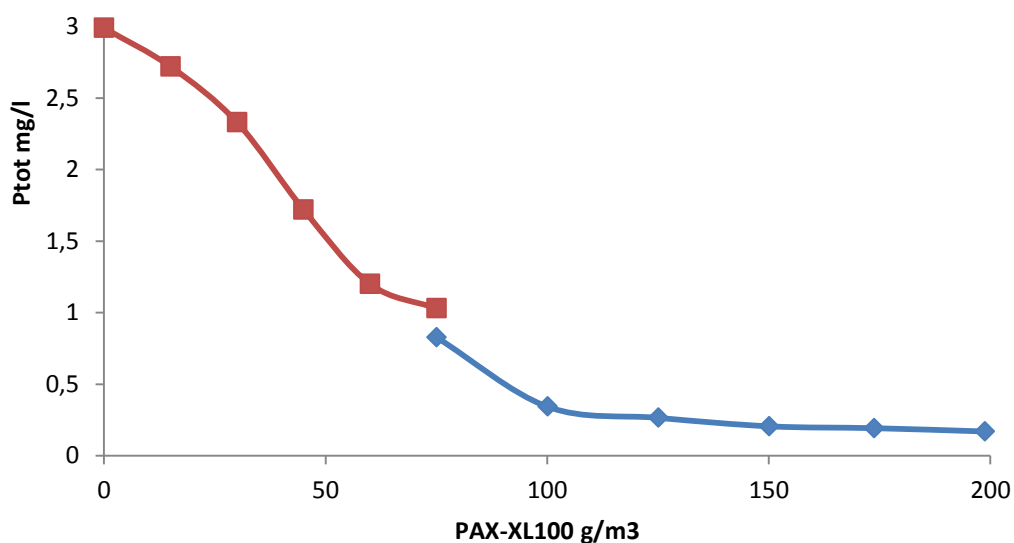
malli on Langen DR 3900. Fosforin analysointimenetelmä on standardin ISO 6878-1-1986 mukainen.

Kesällä 2013 suoritettiin suuri joukko saostuskoesarjoja, joista parhaiten kokonaisuutta kuvaavat tulokset on esitetty seuraavassa kappaleessa. Ne antavat viitteellisen kuvan esisaostuksella saavutettavissa olevasta fosforitasosta Hermanninsaaren puhdistamolla.

5.2 Laboratoriosaostuskokeiden tulokset

Kokeiden tulokset olivat vaihtelevia ja eri päivien fosforituloksia oli vaikea vertailla luotettavasti, koska tuleva jätevesi on joka päivä laadultaan erilaista. Kokeita suoritettiin kuitenkin niin paljon, että jokaiselle kemikaalille pystyttiin arvioimaan optimisyöttöpitoisuus. Sadepäivinä, jolloin tapahtui ohituksia, jätevesi oli visuaalisesti vaaleampaa ja laimeampaa fosforin suhteen. Tällöin pienempi saostuskemikaalin pitoisuus riitti saavuttamaan samat tulokset kuin suuremmalla annostelulla ns. tavallisena päivänä. Kokeita suoritettiin myös lisäämällä rikkihappoa, jotta saataisiin optimaalinen saostus-pH selville. Koesarjojen tuloksissa eri väreillä on kuvattu eri päivinä suoritettuja kokeita.

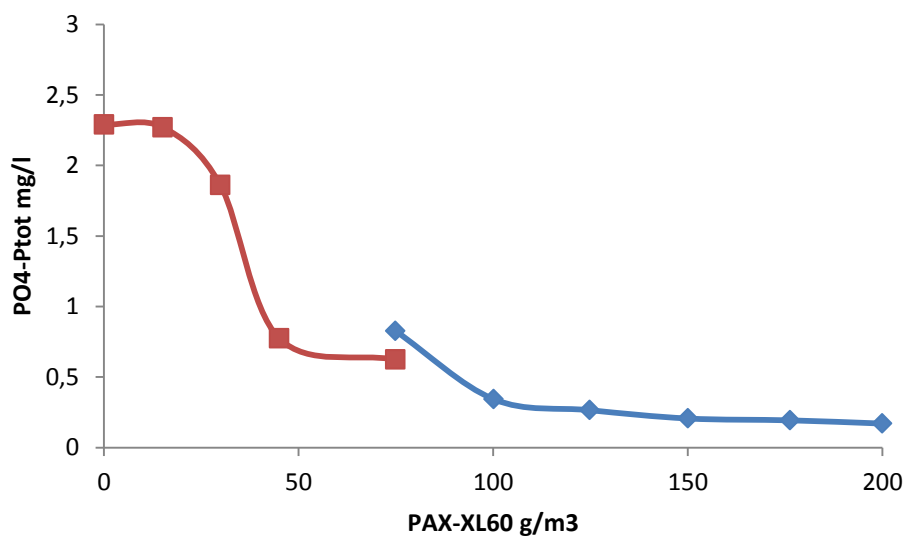
Kuvassa 21 on esitetty fosforipitoisuudet PAX-XL100-kemikaalilla suoritetuissa saostuskoesarjoissa.



Kuva 21. Saostuskokeet PAX-XL100-kemikaalilla.

PAX-XL100-kemikaalilla fosfori saostui tasaisesti ja sillä saavutti hyvin alle 0,5 mg/l fosforipitoisuudet. Kemikaalin annostelulla 100 g/m³ saavutettiin fosforipitoisuus 0,3 mg/l. Yli 100 g/m³ kemikaaliannostelu ei enää merkittävästi paranna tuloksia. Lisäämällä kemikaalin annostusta pitoisuuteen 200 g/m³ fosforipitoisuus alenee 0,2 mg/l asti.

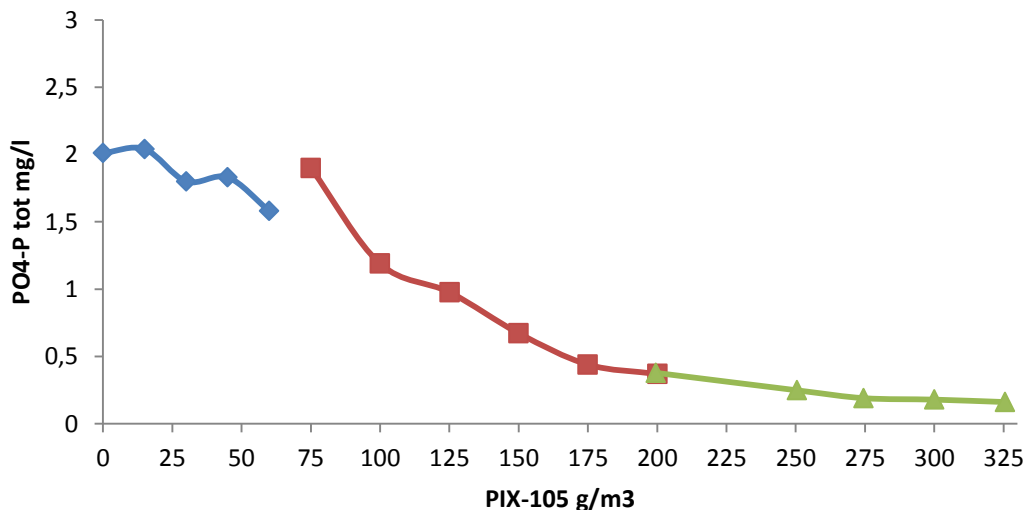
Kuvassa 22 on esitetty fosforipitoisuudet PAX-XL60-kemikaalilla suoritetuissa saostuskoesarjoissa.



Kuva 22. Saostuskokeet PAX-XL60-kemikaalilla.

PAX-XL60 saosti fosforia tasaisesti ja saostuskäyrä on hyvin samankaltainen kuin PAX-XL100-kemikaalilla. 100 g/m³:n annostuksella saavutettiin fosforipitoisuus 0,34 mg/l. Yli 100 g/m³ kemikaaliannostelulla saavutettiin alhaiset fosforitasot alle 0,2 mg/l. Kemikaalin pitoisuudessa 75 g/m³ kahden eri koesarjan tulokset eivät aivan osu samaan pisteeseen, koska kyseessä on eri päivän jätevesinäytteet. Hetkellinen tulokuorma jätevedenpuhdistamolle vaihtelee merkittävästi ja tämän takia tulokset eivät ole täysin samanlaisia eri päivinä.

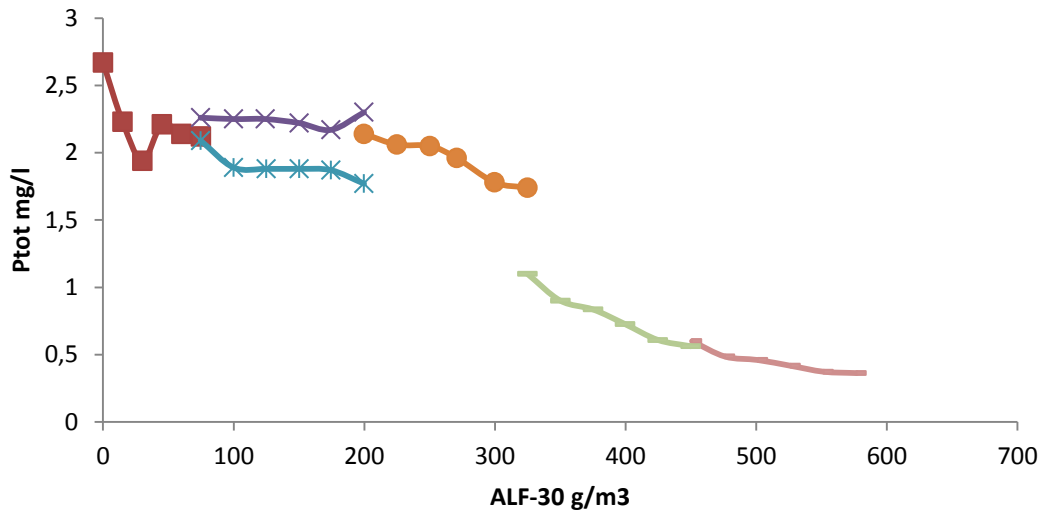
Kuvassa 23 on esitetty fosforipitoisuudet PIX-105-kemikaalilla suoritetuissa saostuskoesarjoissa.



Kuva 23. Saostuskokeet PIX-105-kemikaalilla.

PIX-105-kemikaalia tarvitaan huomattavasti suurempia pitoisuuksia kuin PAX-kemikaaleja, jotta fosforipitoisuus saadaan samalle tasolle. Vasta yli 275 g/m³ kemikaaliannostelulla fosforipitoisuus laskee pitoisuuteen alle 0,2 mg/l. Tämä on lähes kolminkertainen pitoisuus kemikaalia verrattuna PAX-kemikaaleihin. Saostuskäyrä muodostaa tasaisesti laskevan suoran, paitsi pienillä kemikaalin syöttöpitoisuuksilla. Tulokset heittelevät ja erot johtuvat todennäköisesti eri näytepäivän jätevesistä ja niiden laadun vaihteluista.

Kuvassa 24 on esitetty fosforipitoisuudet ALF-30-kemikaalilla suoritetuissa saostuskoesarjoissa.



Kuva 24. Saostuskokeet ALF-30-kemikaalilla.

ALF-30-kemikaalin saostustulokset heittelivät todella paljon, eikä tuloksista muodostunut samanlaista selkeää saostuskäyrää kuin muilla kemikaaleilla. Suurimmillaan kemikaaliannostuksella 575 g/m³ saavutettiin 0,36 mg/l fosforitaso. Kemikaalin annostelumäärä on ylivoimaisesti suurin ja fosforipitoisuudet eivät laske yhtä matalalle tasolle kuin toisilla kemikaaleilla suuresta annostusmäärästä huolimatta.

5.3 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

PAX-XL100 toimi näistä neljästä kemikaalista parhaiten, vaikka PAX-XL60 ylsi lähes samaan tulokseen. Kemikaaleja ALF-30 ja PIX-105 tarvittiin huomattavasti suuremmat pitoisuudet kuin PAX-kemikaalia, jotta saavutettiin samat fosforin tulokset. Vaihtelevien fosforipitoisuuksien ja heikon ennustettavuuden takia ALF-30 ei ole suositeltava valinta laitokselle esisaostuskemikaaliksi. Ilman saostuskemikaalin lisäystä fosfori erottuu laskeutumalla tasolle 2-3 mg/l. Tämä tapahtui optimaalisten sekoitusolosuhteiden ansioista ja reduktioksi saatiin jopa yli

50 %. Kesän kokeiden jälkeen valittiin saostuskemikaaliksi PAX-XL100, sillä sen annostuksella saavutettiin parhaimmat fosforitulokset.

Laboratoriosaostuskokeilla päästään hyvin alhaisiin fosforipitoisuuksiin, jotka riittäisivät lähtevän veden tulevaisuuden tiukempiin lupaehtoihinkin. Näin hyvät tulokset johtuvat siitä, että flokkulaattoreiden sekoitusolosuhteilla pystytään optimoimaan saostuminen. Laitoskokeissa sekoitusolosuhteet eivät ole näin optimaaliset. Seuraavassa luvussa on esitetty laitosmittakaavan koemenetelmät ja niiden tulokset.

6. Laitosmittakaavan esisaostuskokeet

Tässä kappaleessa on esitetty laitosmittakaavan esisaostuskokeiden menetelmät, tulokset ja johtopäätökset.

6.1 Laitosmittakaavan kokeiden menetelmät

Esisaostuskokeet suoritettiin laitoksella tavallisesti käytössä olevalla ajotavalla, joka on nimeltään ”biologinen ravinteidenpoisto”. Ferrosulfaatin syöttöä ei muutettu eli prosessiin annosteltiin kahta eri saostuskemikaalia. Näin meneteltäisiin todennäköisesti käytettäessä ”tehostettu kemiallinen saostus” –ajotapaa eli ”tulva”-ajotapaa huippuvirtaamajaksoina. PAX-XL100:n annostelu säädettiin tulevan jäteveden virtaaman mukaan. Kokeissa käytettiin pelkästään PAX-XL100-kemikaalia, joten tässä luvussa siitä käytetään termiä PAX. Kemikaalin pitoisuus jätevedessä pidettiin vakiona. Tämän mahdollistamiseksi annostelupumpuille syötettiin kaava, joka on esitetty yhtälössä 1.

$$PAX - annostelu \ (l/h) = \frac{pitoisuus \ (g/m^3) \times tuntivirtaama \ (m^3/h)}{1000 \ (g/kg) \times PAX \ tiheys \ (kg/L)} \quad (1)$$

Kemikaalille ei järjestetty erillistä sekoitusta, koska se sekoittui nopeasti virtaavaan turbulenttiseen jäteveteen. Saostus tapahtui esiselkeytysaltaissa. Näytteenottimet ottivat näytteitä kolmesta eri kohdasta: esiselkeytykseen tulevasta vedestä (EST), esiselkeytetystä lähtevästä vedestä linjalta 1 (ESL1) ja linjalta 2 (ESL2).

Esiselkeytykseen tulevan jäteveden näyte otettiin vedenjakoaltaasta ja esiselkeytetyt näytteet kaivoista, joihin vesi virtaa esiselkeytyksen jälkeen. Vedenjakoaltaassa jäteveden fosforipitoisuus on sama kuin tulevassa jätevedessä. Edellä kuvatut paikat on esitetty Hermanninsaaren prosessin lohkokaaviossa kuvassa 18. Annostelupisteinä kokeiltiin hiekanerotusallasta sekä esiselkeytyksen vedenjakokaivoja, jotka johtavat jäteveden esiselkeytysaltaisiin. Kemikaalin annostelu aloitettiin ensimmäisen näytteenottokerran jälkeen.

Kuvassa 25 on esitetty kemikaalipumppauksen tekniset järjestelyt pumppaustilassa. Molemmille linjoille oli omat kemikaalipumppunsa (P1 ja P2), joilla oli erilliset imulinjat. Pumppujen painepuolella oli sulkuventtiilit (V1 ja V2) ja annostelulinjat (L1 ja L2) jäteveden esikäsittelyrakennukseen kemikaalisäiliön pumppaustilasta.



Kuva 25. Kemikaalipumppauksen tekniset järjestelyt.

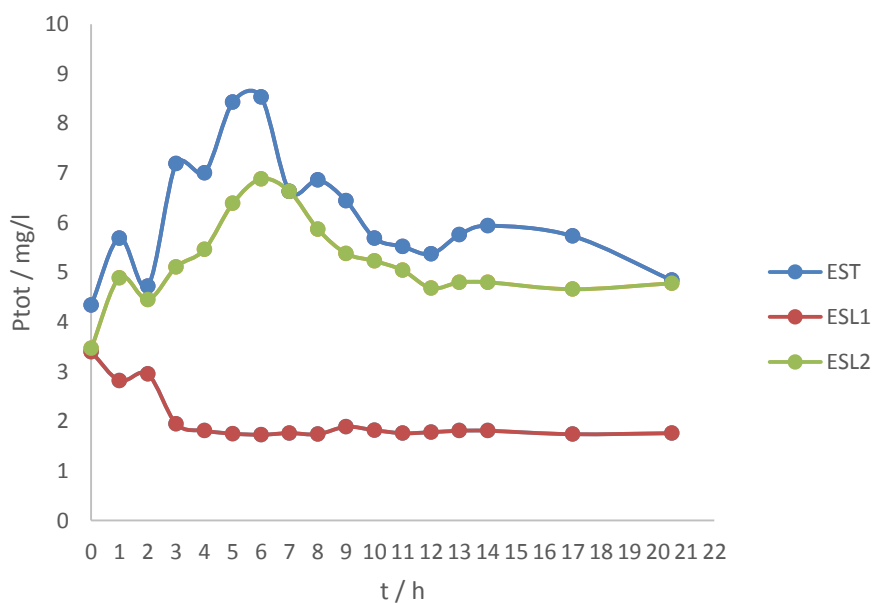
Laitoskokeita suoritettiin useita ja taulukossa 8 on listattu näiden kokeiden koeolosuhteet. PAX-kemikaalin annostelupaikat ja tarkat määrät kevään 2014 aikana on esitetty liitteessä 7.

Taulukko 8. Laitoskokeiden koeolosuhteet

| Koesarja | Syöttöpitoisuus g/m ³ | Syöttöpiste | Koesarjan kesto |
|----------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| 1 | 120 | hiekanerotusallas | 21 h |
| 2 | 200 | hiekanerotusallas | 4 h |
| 3 | 150 | hiekanerotusallas | 5 h |
| 4 | 200 | hiekanerotusallas | 5 h |
| 5 | 100 | hiekanerotusallas | 8 d |
| 6 | 150/100 | hiekanerotusallas/vedenjakokaivo | 58 d |

6.2 Laitosmittakaavan kokeiden tulokset

Kuvassa 26 on esitetty koesarjan 1 tulokset. PAX:n annostelupitoisuus oli 120 g/m³. Näytteet otettiin kertaanäytteinä ja annostelupisteenä käytettiin hiekanerotusallasta.

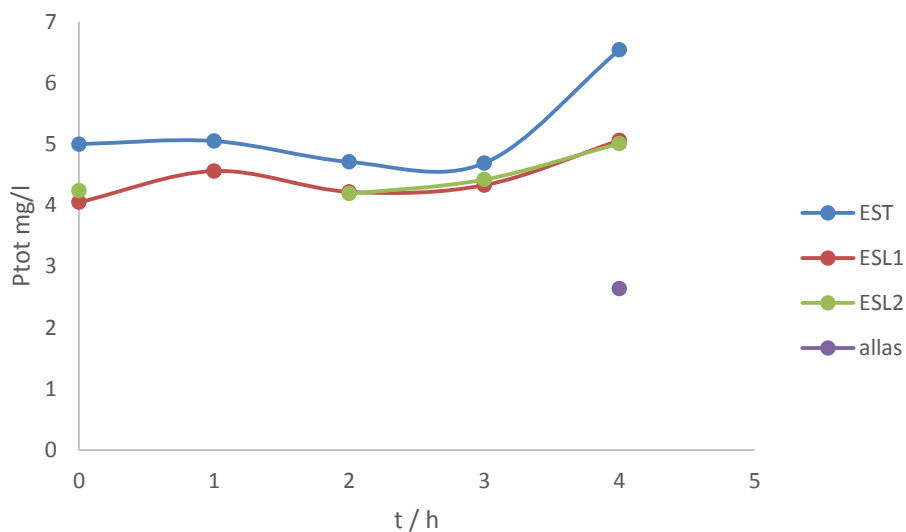


Kuva 26. Koesarjan 1 fosforipitoisuudet.

Linjan 1 esiselkeytetyn veden fosforipitoisuus stabiloituu jo kolmen tunnin jälkeen alle 2 mg/l pitoisuuteen. Kokeen aikana linjan 1 pumppu pumppasi kemikaalia, mutta linjan 2 pumppu ei eli linjan 2 fosforitulokset toimivat vertailuna. Tulevan jäteveden fosforipitoisuudet vaihtelevat asutuksen vuorokausirytmien mukaan. Ensimmäinen

näyte ajanhetkellä 0 on otettu klo 8 aamulla. Fosforipitoisuus nousee tasaisesti aamupäivän edetessä. Yksittäisten näytteiden vaikutusten pienentämiseksi näytteenottotapa vaihdettiin koesarjan 1 jälkeen tunnin kokoomanäytteiksi. Tällöin näytteenotin otti 10 minuutin välein näytteitä, jotka kerättiin astiaan.

Koesarjassa 2 kemikaalin annostelupitoisuus nostettiin pitoisuuteen 200 g/m^3 . Tulokset näkyvät kuvassa 27.

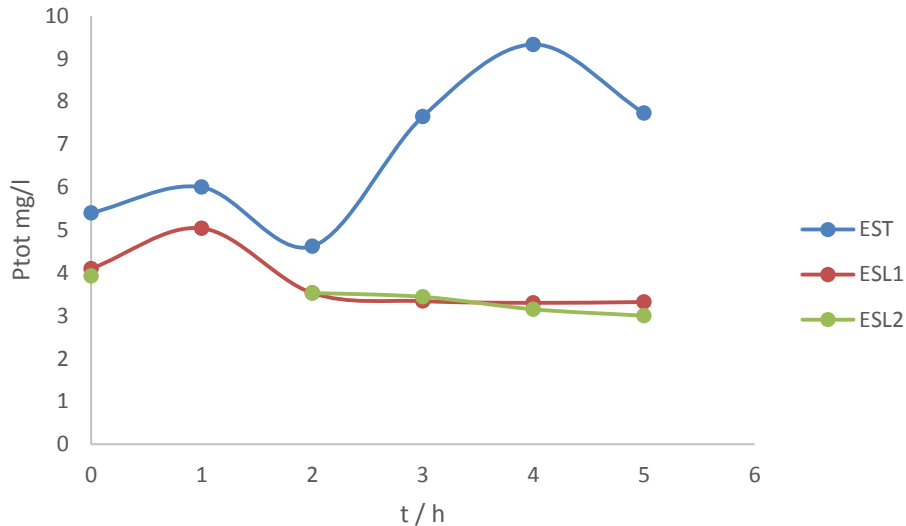


Kuva 27. Koesarjan 2 fosforipitoisuudet.

Fosforinpoistotulokset ovat heikot. Selkeytysaltaan jätevesi kuitenkin kirkastui, joten näytteenottimien luotettavuuden testaamiseksi molemmista selkeytysaltaista otettiin käsin kertanäytteet neljännen tunnin kohdalla. Molempien linjojen esiselkeytysallasnäytteiden fosforipitoisuudet olivat $2,6 \text{ mg/l}$. Kuvasta 27 nähdään, että nämä kertanäytteistä analysoidut pitoisuudet eroavat näytteenottimilla saatujen näytteiden tuloksista. Laitoksen rakenteita ja virtauksia tarkasteltaessa päädyttiin siihen, että automaattisilla näytteenottimilla otettiin näytejätevettä väärästä paikasta. Näytteisiin pääsi sekoittumaan käsittelemätöntä tulevaa jätevettä.

Koesarjassa 2 havaittujen näytteenotto-ongelmien vuoksi näytteenotto siirrettiin vedenjakokaivoista suoraan esiselkeytysaltaille. Näytteenottimet sijoitettiin esiselkeytysaltaiden kaivoihin, johon esiselkeytetty vesi johdetaan altaasta ylivuotokourua pitkin. Näytteenottimet säädettiin ottamaan näytteet tunnin

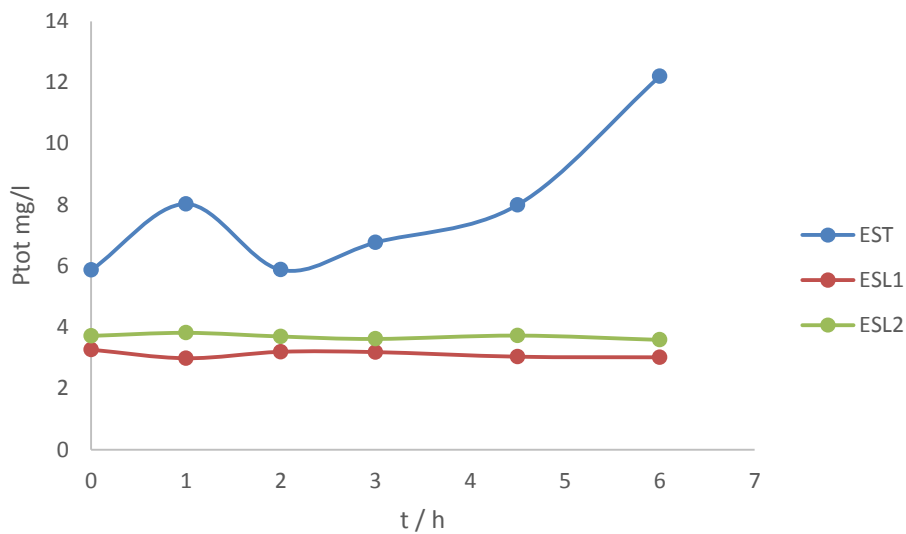
kokoomanäytteinä 10 minuutin välein. Tämä näytteenottotapa otettiin käyttöön koesarjassa 4, jonka PAX-annostelupitoisuus oli 150 g/m^3 . Tulokset näkyvät kuvasta 28.



Kuva 28. Koesarjan 3 fosforipitoisuudet.

Tulokset paranevat selkeästi koesarjassa 3 verrattuna koesarjaan 2. Linjan 2 näytteenotin ei ottanut näytteitä ensimmäisen tunnin aikana. Ensimmäisen kahden tunnin aikana PAX-annostuksen aloituksesta molempien linjojen esiselkeytetyn jäteveden tulokset seuraavat tulevan jäteveden fosforipitoisuutta, mutta tämän jälkeen stabiloituvat pitoisuuteen noin 3 mg/l .

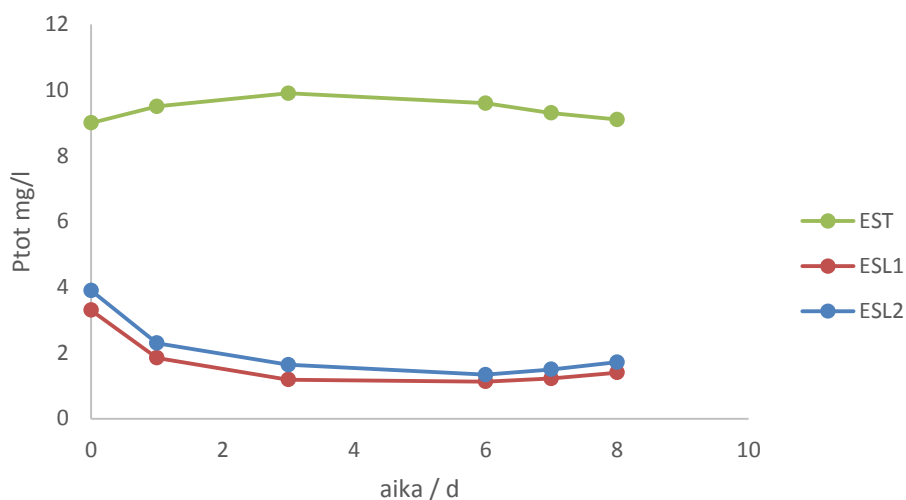
Koesarjassa 4 PAX-annostus kasvatettiin pitoisuuteen 200 g/m^3 . Kuvasta 29 nähdään koesarjan 4 tulokset.



Kuva 29. Koesarjan 4 fosforipitoisuudet.

Koesarjan 4 aikana linjan 2 näytteenotin ei ottanut näytteitä ajastimen mukaisesti, vaan saadut näytteet ovat kertanäytteitä. Linjan 1 esiselkeytetyn jäteveden fosforipitoisuudet ovat noin 3 mg/l. Linjan 2 esiselkeytetyn jäteveden fosforitulokset pysyttelevät tasolla 4 mg/l. Vertaamalla näitä tuloksia aikaisempien koesarjojen tuloksiin, voidaan nähdä että fosforipitoisuudet eivät laske suuremmasta PAX-annostelupitoisuudesta huolimatta.

Koesarjassa 5 PAX-annostelu laskettiin pitoisuuteen 100 g/m^3 . Näytteet analysoitiin vuorokauden välein 8 vuorokauden ajan. Tämän koesarjan tulokset on esitetty kuvassa 30.

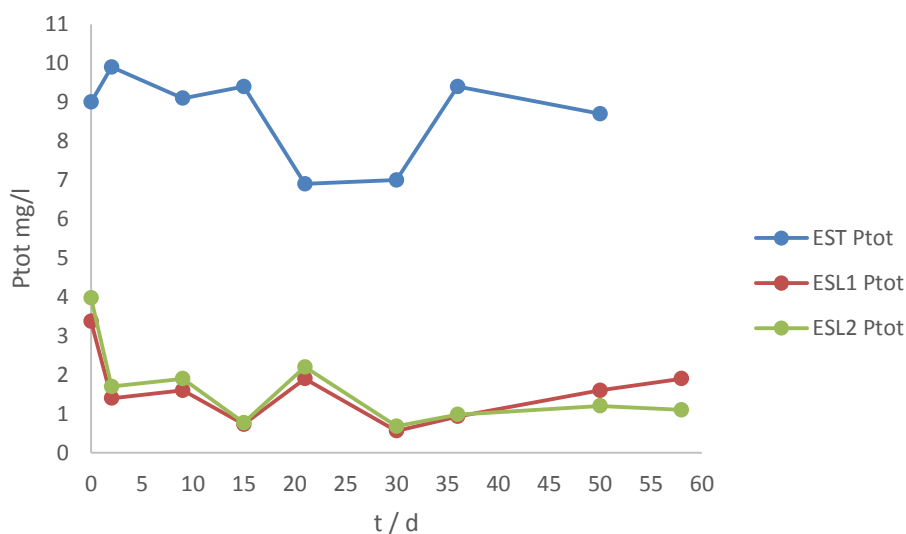


Kuva 30. Koesarjan 5 fosforipitoisuudet.

Koesarjan 5 linjojen fosforitulokset ovat samankaltaiset ja tasoittuvat kolmen vuorokauden jälkeen noin tasolle 1,5 mg/l. Päivien 6-8 tulosten nousevat arvot johtuvat tulevan jäteveden vaihtelevasta fosforikuormasta. Koetulosten perusteella on havaittavissa, että PAX-annostelu vaatii kolmen vuorokauden annosteluajan ennen kuin tulokset stabiloituvat.

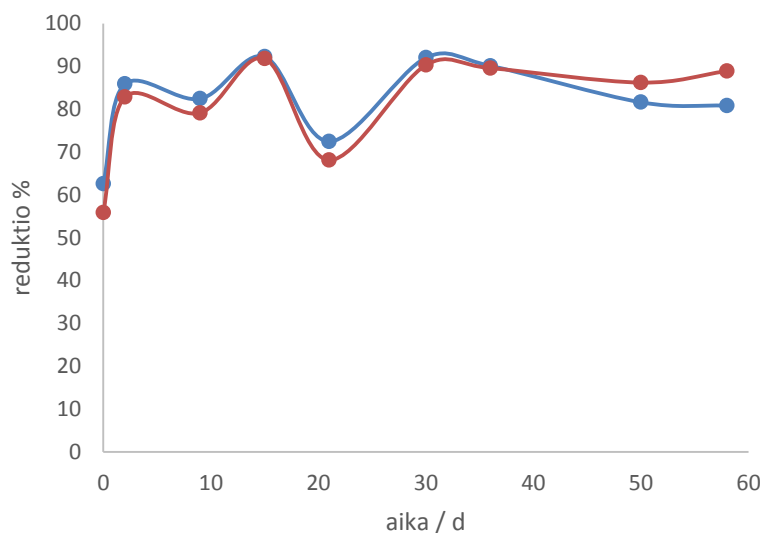
Koesarjan 5 tuloksista huomataan, että fosforipitoisuudet laskevat vasta muutaman vuorokauden jälkeen. Esiselkeytysaltaan viipymät jätevedelle kyseisinä päivinä ovat olleet vain noin 3-5 tuntia. Kemikaalin annostelun aloituksen jälkeen laskennallisen viipymäajan kuluttua koko esiselkeytysallas pitäisi olla täynnä kemikaloitua jätevettä. Tällöin fosforitulos teoriassa stabiloituu. Käytännössä tämä tapahtuu kuitenkin koesarjassa 5 huomattavasti myöhemmin verrattuna laskennalliseen viipymäaikaan. Todennäköisesti altaassa on oikovirtauskohtia, jolloin kemikaloimatonta jätevettä virtaa vielä esiselkeytysaltaasta. Kemikaloimaton jätevesi sekoittuu kemikaloituun jäteveeseen, mikä nostaa näytteiden fosforipitoisuuksia.

Koesarjassa 6 PAX-annostelua jatkettiin 58:n päivän ajan. Annostelupitoisuus oli ensimmäisen 15 päivän ajan 150 g/m^3 ja tämän jälkeen 100 g/m^3 . Annostelupaikkana oli ensimmäisen 28:n päivän ajan hiekanerotusallas ja tämän jälkeen vedenjaonkaivot. Tulokset on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. Koesarjan 6 fosforipitoisuudet

Fosforipitoisuudet tasoittuvat muutaman päivän kemikaaliannostelun jälkeen noin tasolle 1,5 mg/l. Annostelupitoisuuden lasku aiheutti näytteiden hetkellisen fosforipitoisuuksien nousun, mutta ne tasoittuivat takaisin fosforipitoisuuteen tasolle 1 mg/l. Annostelupaikan muutos nosti hieman linjan 2 fosforipitoisuuksia. Kuvassa 32 on esitetty koesarjan 7 esiselkeytetyn veden fosforinpoistotehot.



Kuva 32. Koesarjan 7 esiselkeytetyn veden fosforinpoistotehot

Fosforinpoistoteho nousee 80–90 % välille, huomioimatta 21. päivän arvoja. Poistoteho nousee huomattavasti verrattuna Hermanninsaaren puhdistamon tavallisen esiselkeytetyn jäteveden 50–60 %:n poistotehoon.

6.3 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Laitoskokeiden tulosten perusteella esisaostus PAX-kemikaalilla laskee huomattavasti fosforipitoisuutta esiselkeytetyssä jätevedessä. Ilman esisaostusta esiselkeytetyn veden fosforipitoisuus vaihteli pitoisuuksien 3–4 mg/l välillä ja esisaostuksella pitoisuus vaihteli välillä 1–2 mg/l. Pitkäkestoisimman koesarjan 7 pitoisuuksien keskiarvo oli 1,3 mg/l. Fosforinpoistoreduktio myös kasvaa tavallisesti esiselkeytyksessä 55 %:sta 85 %:iin. Kokeista havaittiin, että tulevan jäteveden fosforipitoisuuksien vaihtelu ei vaikuttanut esisaostetun esiselkeytetyn jäteveden fosforituloksiin, kun näytteenotto oli siirretty oikeaan paikkaan.

PAX-annostelua kokeiltiin pitoisuuksilla 100, 120, 150 ja 200 g/m³. Fosforitulokset eivät parantuneet suuremmasta annostelupitoisuudesta huolimatta, minkä takia optimaaliseksi annosteluksi valittiin 100 g/m³. Eripituisista kokeista havaittiin se, että fosforitulokset stabiloituvat vasta muutaman päivän annostelun jälkeen johtuen esiselkeytysaltaan oikovirtauksista. Esiselkeytysallas täyttyy siis kokonaan PAX-kemikaloidusta jätevedestä huomattavasti pidemmällä viipymällä käytännössä kuin laskennallisesti. Tämän takia alle vuorokauden mittaisten kokeiden fosforitulokset jäivät noin tasolle 3 mg/l, eivätkä ne kuvasta PAX:n todellista saostustehoa.

Annostelupaikoilla ei ollut merkitystä fosforituloksiin, joten optimaaliseksi syöttöpaikaksi valittiin vedenjakokaivo. Tätä paikkaa käytettäessä kaikki syötetty kemikaali johdetaan esiselkeytysaltaalle, eikä lainkaan ilmastusaltaalle. Tällöin kemikaalia pystytään annostelemaan vähemmän.

Näitä arvoja käytetään myöhemmin luvussa 7 arvioidessa riittäisikö esisaostuksen teho hulevesivirtaamien aikana täyttämään todennäköisesti kiristyvän ympäristöluvan vaatimukset.

7. Hermanninsaaren puhdistamon fosforin kuormituslaskenta

Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon purkuvesistön kannalta merkittävintä on sinne johdettava fosforikuormitus (kg/d). Meressä ravinnepitoisuudet laimenevat nopeasti, mutta ravinteiden kokonaiskuorma kuvaa yksiselitteisesti fosforin merkitystä vesistölle. Tämän takia on tärkeää tarkastella puhdistamolta lähtevää kuormitusta. Vesistöön johdettava kuormitus lasketaan ohitusvesien ja koko puhdistusprosessin läpikäyneen jäteveden summana. Tämän takia ohitusvedet nostavat vesistöön lähtevän veden kuormitusta, jota pyritään tulevaisuudessa vähentämään esisaostuksella.

Diplomityön aikana talvella 2014 puhdistamolle ei tullut merkittäviä hulevesivirtaamia vähälumisen talven takia. Tämän takia esisaostuksen vaikutusta huippuvirtaamavuorokausille ei saatu tutkittua. Laitoskokeista on kuitenkin saatu arvio siitä, miten PAX-annostelu parantaa esiselkeytetyn jäteveden tuloksia. Vuonna 2012 oli hyvin runsasluminen talvi ja tämän takia puhdistamon tulevan jäteveden virtaama keväällä kasvoi huomattavasti. Tässä kappaleessa tutkitaan laskennallisesti kuinka paljon esisaostus olisi parantanut puhdistustuloksia vuonna 2012. Lumien sulamisajankohta ajoittuu maalis-huhtikuulle, joten tällöin toinen vuosineljännes on kriittisin, jotta luparajan pitoisuutta 0,3 mg/l ei ylitettäisi. Laskennoissa on tarkasteltu maaliskesäkuun tietoja.

Ympäristöviranomaiset tarkastelevat jätevedenpuhdistustuloksia vuosineljänneskeskiarvoina lukuun ottamatta typenpoistoa, jonka lupaehto on määritetty poistoreduktion vuosikeskiarvona. Hermanninsaaren puhdistamon velvoitetarkkailun näytteitä otetaan kahden viikon välein, mutta diplomityön aikana näytteet otettiin kerran viikossa. Muiden kuin velvoitetarkkailupäivien fosforiarvot perustuvat seuraavana esitettävään laskentamalliin

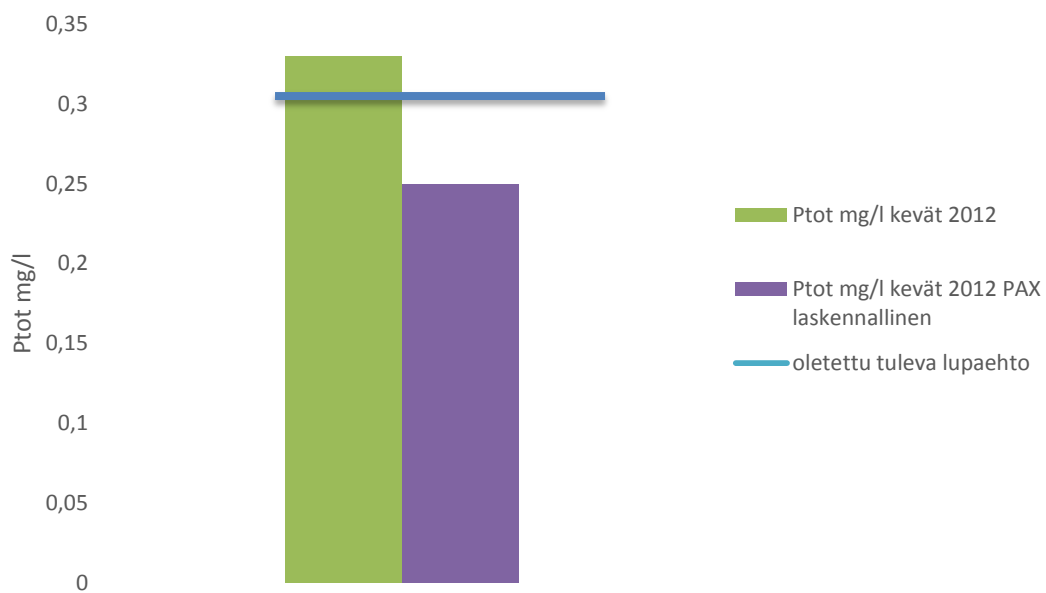
Velvoitetarkkailun tulosten perusteella lasketaan keskiarvo tulevan jäteveden fosforikuormitukselle (kg/d), lähtevän veden fosforipitoisuudelle (mg/l) ja esiselkeytyksen fosforin poistoreduktiolla (%). Nämä keskiarvot oletettiin laskennassa vakioiksi jokaiselle päivälle, muiden kuin näytteenottopäivien arvojen

fosforitietojen laskemiseksi. Saadut keskiarvot olivat seuraavat: tulevan jäteveden fosforikuormitus 124 kg/d, lähtevän jäteveden fosforipitoisuus 0,18 mg/l ja esiselkeytyksen fosforin poistoreduktio 50 %.

Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolle tulevia virtaamia on yksi ja lähteitä kolme. Tuleva virta on tuleva jätevesi ja lähtevät ovat lähtevä jätevesi, ohitusvedet ja kuivattu liete. Hermanninsaaren puhdistamolla on virtausmittaus tulevalle jätevedelle ja ohitusvirtaamalle. Kuivatun lietteen massa on tiedossa ja sen tilavuus lasketaan tiheyden 1,2 kg/l avulla. Lähtevän jäteveden virtaus voidaan laskea vähentämällä tulevan jäteveden virtauksesta ohitusvirtaukset ja kuivatun lietteen tilavuus. Näiden neljän virtaaman ja edellä mainittujen oletusten avulla on laskettu fosforikuormitukset ja – pitoisuudet tulevalle, esiselkeytetylle, lähtevälle ja vesistöön johdettavalle jätevedelle sekä ohitusvirtaamille. Nämä on esitetty liitteessä 8.

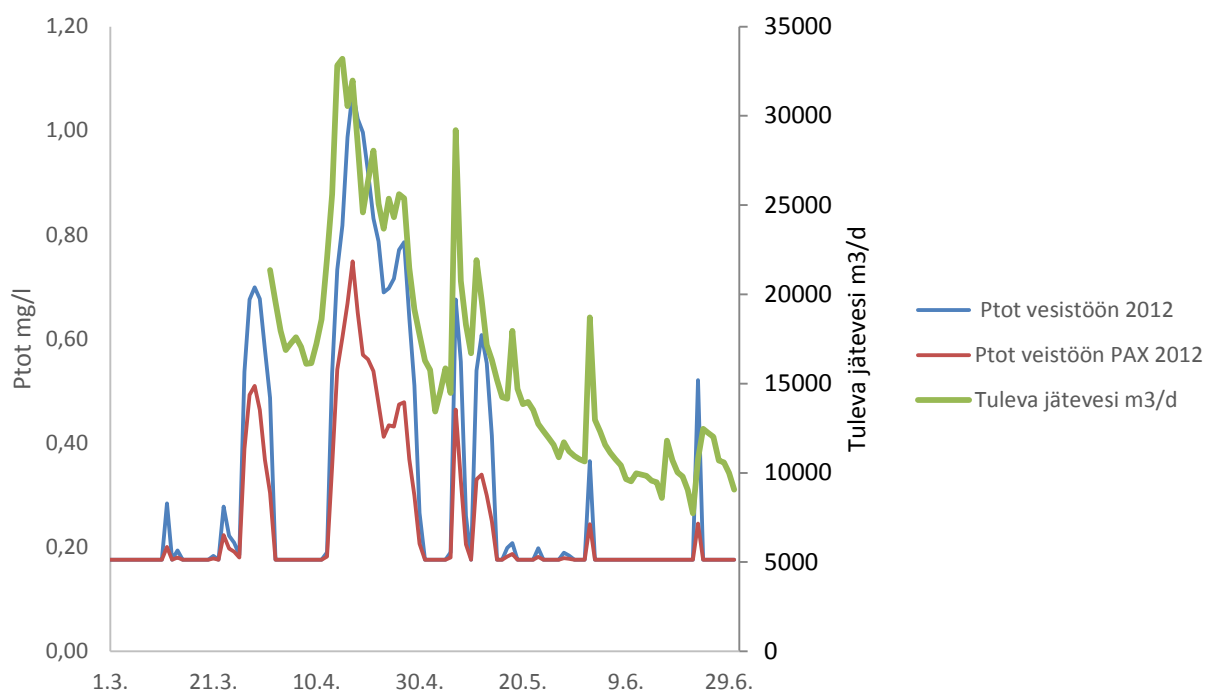
Kaikki nämä edellä mainitut arvot laskettiin kahdesti; ensin vuonna 2012 toteutuneet arvot ja sitten esisaostuksen kanssa. Esisaostuksen laskennoissa vakioksi oletettiin samat arvot lukuunottamatta esiselkeytetyn jäteveden poistotehoa, jolle oletettiin fosforipitoisuus 1,3 mg/l. Laitoskokeiden perusteella huomattiin, että esisaostusta käytettäessä fosforipitoisuus pysyi tasaisena jäteveden vaihtelevasta tulokuormituksesta huolimatta, toisinkuin poistoteho. Näiden laskentojen arvoja vertailemalla voidaan arvioida esisaostuksen tehoa huippuvirtaamien aikana. Esisaostuksen vaikutukset prosessivirtojen fosforiarvoihin näkyvät liitteen 9 tiedoissa. Liitteessä termillä PAX kuvataan esisaostustilannetta.

Kuvassa 33 on esitetty toisen vuosineljänneksen fosforipitoisuuden keskiarvot vesistöön johdettavasta jätevedestä. Vuonna 2012 toteutunut keskiarvo oli 0,33 mg/l eli se olisi ylittänyt lupaehdon. Tehostamalla puhdistusprosessia esisaostuksella sama keskiarvo olisi ollut 0,25 mg/l eli tiukempi lupaehdo olisi ollut saavutettavissa.



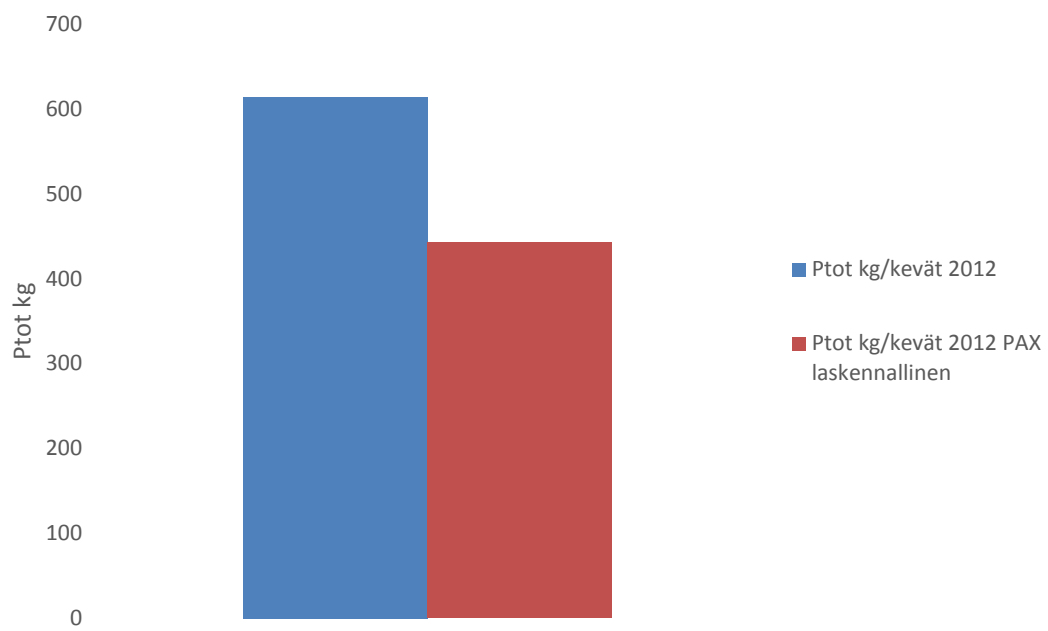
Kuva 33. Vuoden 2012 toisen vuosineljänneksen vesistöön johdettavan jäteveden fosforipitoisuus ja laskennallinen arvio esisaostuksen vaikutuksesta

Kuvassa 34 on esitetty vesistöön johdettavan jäteveden fosforipitoisuuden päivittäiset arvot. Kuvasta nähdään huippuvirtaamista johtuvien ohitusvesien vaikutukset. Esisaostuksella voidaan pienentää näiden piikkien fosforipitoisuutta merkittävästi. Lähtevän jäteveden keskiarvoksi on saatu aikaisemmin esitetyn laskennan perusteella 0,18 mg/l.

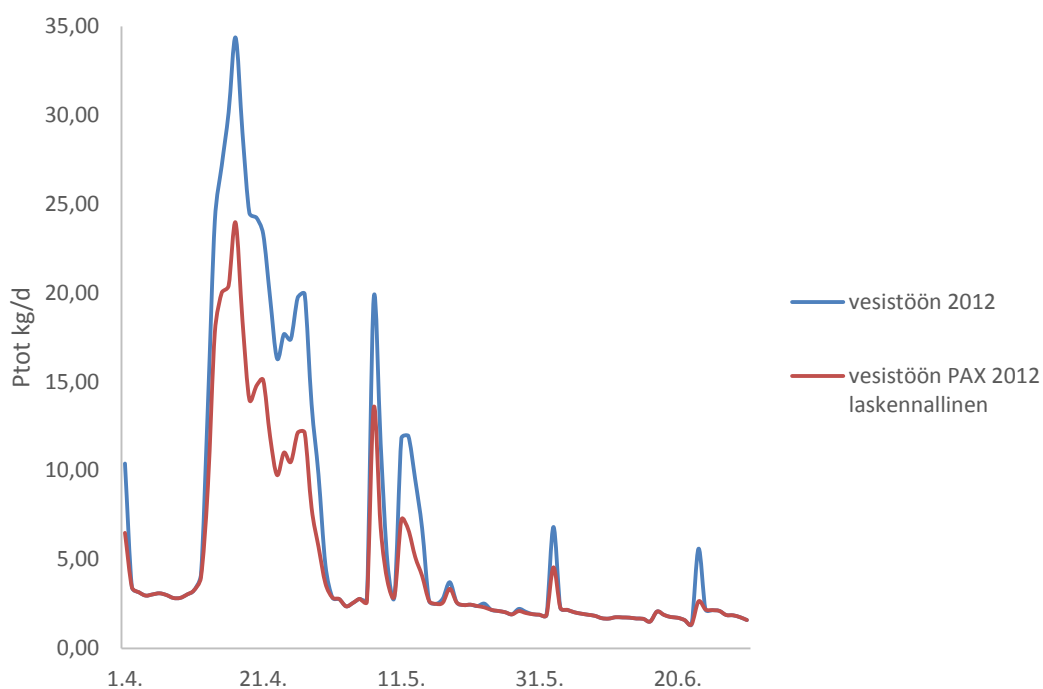


Kuva 34. Vuoden 2012 toisen vuosineljänneksen vesistöön johdettavan jäteveden fosforipitoisuudet päivittäiset arvot ja laskennalliset arviot esisaostuksen vaikutuksesta

Esisaostus vähentäisi myös vesistöön johdettavan jäteveden fosforikuormitusta. Kuvassa 35 ja 36 on esitetty kuormituksen vähentyminen esisaostuksen kanssa. Kuvassa 35 on esitetty koko toisen vuosineljänneksen aikana vesistöön johdettava kuormitus ja kuvassa 36 vastaavasti päivittäiset arvot.



Kuva 35. Vuoden 2012 toisen vuosineljänneksen vesistöön johdettavan jäteveden fosforikuormitus ja laskennallinen arvio esisaostuksen vaikutuksesta



Kuva 36. Vuoden 2012 toisen vuosineljänneksen vesistöön johdettavan jäteveden fosforikuormituksen päivittäiset arvot vuonna 2012 ja laskennalliset arviot esisaostuksen vaikutuksesta

Näiden laskentojen perusteella esisaostus olisi riittävä puhdistusprosessin tehostusmenetelmä täyttämään oletettavasti kiristyvän lupaehdon fosforivaatimukset.

8. Kuormitusvaihteluiden seuraukset biologiseen prosessiin

Tässä kappaleessa tutkitaan Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon aktiivilieteprosessia simulointiohjelman avulla.

8.1 Teoria

PAX-kemikaalin annostelun vaikutuksia aktiivilieteprosessiin Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla arvioitiin Activated Sludge Model –ohjelman (ASM) avulla. Ohjelma on kehitetty Cape Townin yliopiston tutkimusryhmässä. Tarkoituksena on selvittää, mikä osa biologista prosessia on kriittisin huippuvirtaamakausilla ja tämän perusteella selvittää sopivin ajotapa biologiselle prosessille, jota sovellettaisiin esisaostusta käytettäessä. Mallintamisessa on otettu huomioon monia prosesseja, joista tärkeimpiä ovat hiiliyhdisteiden hapettuminen, nitrifikaatio ja denitrifikaatio. Taulukossa 9 on esitetty näiden kolmen prosessin kinetiikkaa eri liukoisten ja kiintoaineparametrien avulla.

Table 2 Process kinetics and stoichiometry for carbon oxidation, nitrification, and denitrification

| Component → i | | j Process ↓ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | Process Rate, ρ_j [$ML^{-3} T^{-1}$] |
|--|--|-------------|---|--|---|---|---|---|--|--|---|---|---|---|---|---|
| | | | S_t | S_b | X_t | X_s | $X_{B,H}$ | $X_{B,A}$ | X_P | S_O | S_{NO} | S_{NH} | S_{ND} | X_{ND} | S_{ALK} | |
| 1 | Aerobic growth of heterotrophs | | | $-\frac{1}{Y_H}$ | | | 1 | | | $-\frac{1-Y_H}{Y_H}$ | | $-i_{XB}$ | | | $-\frac{i_{XB}}{14}$ | $\mu_H \left(\frac{S_b}{K_s + S_b} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H}$ |
| 2 | Anoxic growth of heterotrophs | | | $-\frac{1}{Y_H}$ | | | 1 | | | | $-\frac{1-Y_H}{2.86 Y_H}$ | $-i_{XB}$ | | | $\frac{1-Y_H}{14 \cdot 2.86 Y_H} - i_{XB}/14$ | $\mu_H \left(\frac{S_b}{K_s + S_b} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \times \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H}$ |
| 3 | Aerobic growth of autotrophs | | | | | | | 1 | | $-\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$ | $\frac{1}{Y_A}$ | $-\frac{1}{Y_A}$ | | | $-\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7 Y_A}$ | $\mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$ |
| 4 | 'Decay' of heterotrophs | | | | | | $1 - f_P$ | -1 | f_P | | | | | $i_{XB} - f_P i_{XP}$ | | $b_H X_{B,H}$ |
| 5 | 'Decay' of autotrophs | | | | | | $1 - f_P$ | | f_P | | | | | $i_{XB} - f_P i_{XP}$ | | $b_A X_{B,A}$ |
| 6 | Ammonification of soluble organic nitrogen | | | | | | | | | | | 1 | -1 | | $\frac{1}{14}$ | $k_a S_{ND} X_{B,H}$ |
| 7 | 'Hydrolysis' of entrapped organics | | | 1 | | | -1 | | | | | | | | | $k_h \frac{X_s/X_{B,H}}{K_X + (X_s/X_{B,H})} \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_b \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H}$ |
| 8 | 'Hydrolysis' of entrapped organic nitrogen | | | | | | | | | | | | 1 | -1 | | $\rho_A (X_{ND}/X_s)$ |
| Observed Conversion Rates [$ML^{-3} T^{-1}$] | | | $r_i = \sum_j \nu_{ij} \rho_j$ | | | | | | | | | | | | | |
| Stoichiometric Parameters: Heterotrophic yield: Y_H Autotrophic yield: Y_A Fraction of biomass yielding particulate products: f_P Mass N/Mass COD in biomass: i_{XB} Mass N/Mass COD in products from biomass: i_{XP} | | | Soluble inert organic matter [$M(COD)L^{-3}$] | Readily biodegradable substrate [$M(COD)L^{-3}$] | Particulate inert organic matter [$M(COD)L^{-3}$] | Slowly biodegradable substrate [$M(COD)L^{-3}$] | Active heterotrophic biomass [$M(COD)L^{-3}$] | Active autotrophic biomass [$M(COD)L^{-3}$] | Particulate products arising from biomass decay [$M(COD)L^{-3}$] | (Oxygen (negative COD) [$M(-COD)L^{-3}$] | Nitrate and nitrite nitrogen [$M(N)L^{-3}$] | NH_4^+ and NH_3 nitrogen [$M(N)L^{-3}$] | Soluble biodegradable organic nitrogen [$M(N)L^{-3}$] | Particulate biodegradable organic nitrogen [$M(N)L^{-3}$] | Alkalinity – Molar units | Kinetic Parameters: Heterotrophic growth and decay: $\mu_H, K_s, K_{O,H}, K_{NO}, b_H$ Autotrophic growth and decay: $\mu_A, K_{NH}, K_{O,A}, b_A$ Correction factor for anoxic growth of heterotrophs: η_g Ammonification: k_a Hydrolysis: k_h, K_X Correction factor for anoxic hydrolysis: η_b |

Helposti hajoava substraatti S_S kuuluu heterotrofisten bakteerien kasvussa sekä hapellisissa että anoksisissa olosuhteissa. Vastaavasti S_S muodostuu bioflokkiin kiinnittyneen kiinteän orgaanisen aineen hydrolyysin kautta. Hitaasti hajoava substraatti X_S kuuluu hydrolyysin kautta ja muodostuu heterotrofisen ja autotrofisen biomassan anaerobisen hajoamisen myötä. (Henze, 2002)

Heterotrofista biomassaa kuvaa $X_{B,H}$ ja autotrofista $X_{B,A}$. Heterotrofista biomassaa syntyy sekä hapellisissa että anoksisissa olosuhteissa, toisin kuin autotrofista, jota syntyy ainoastaan hapellisissa olosuhteissa. Heterotrofiset bakteerit hyödyntävät kasvuunsa orgaanisia hiiliyhdisteitä ja autotrofiset vastaavasti epäorgaanisia (Metcalf, 1991). Molempien biomassatyyppien hajoaminen tapahtuu anaerobisen hajoamisen aikana. X_P kuvaa kiinteitä partikkeleita, joita syntyy biomassan mädäntymisen yhteydessä. Näiden partikkeleiden hajoaminen on niin hidasta, että sitä ei oteta huomioon ollenkaan tässä ohjelmassa. Tämän termin avulla malliin saadaan kuitenkin lisättyä inertin biomassan parametri. (Henze, 2002)

Taulukossa komponenteille S_I ja X_I eli inerteille liukoiselle ja kiinteälle orgaaniselle aineelle ei ole annettu kertoimia millekään prosessille, koska nämä komponentit eivät osallistu reaktioihin. Nämä parametrit ovat kuitenkin listattuna taulukkoon, koska ne vaikuttavat muiden prosessien kulkuun. Liukoinen inertti orgaaninen aine kulkeutuu lähtevään veteen ja kiinteä inertti aine vastaavasti aktiivilietesysteemin hajoavaan kiintoaineeseen. (Henze, 2002)

Haihtuvien kiinteiden aineiden summa koostuu viidestä eri parametrusta. Nämä ovat hitaasti hydrolysoituvat substraatit X_S , heterotrofisen biomassan $X_{B,H}$, aktiivinen autotrofisen biomassan $X_{B,A}$, anaerobisen hajoamisen aikana syntyvät partikkelit X_P ja inertti kiinteä orgaaninen aine X_I . (Henze, 2002)

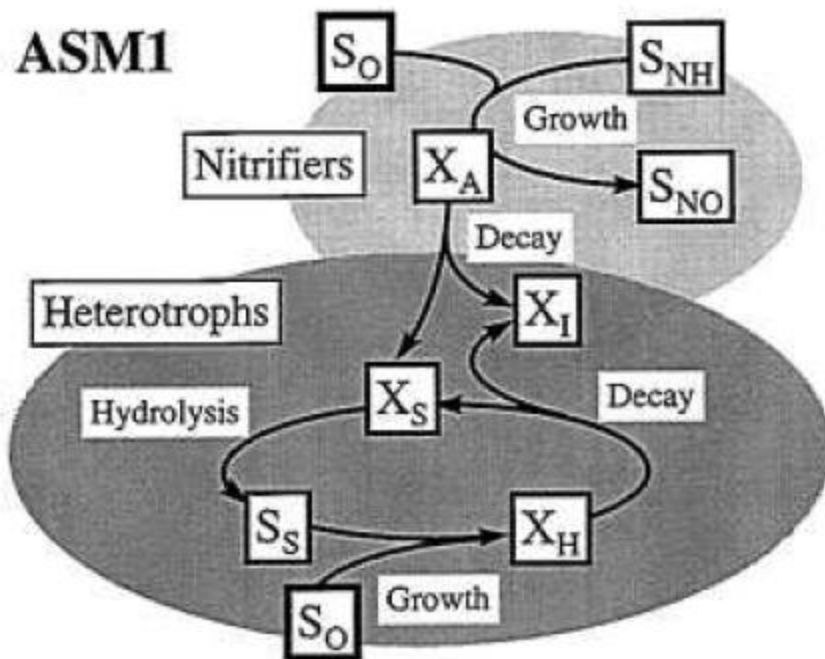
Liukoisen hapen pitoisuutta DO kuvataan S_O :lla. Hapen reaktiot liittyvät ainoastaan heterotrofisen ja autotrofisen biomassan kasvuun. Solukuolemien aikana hitaasti hajoavat substraatit vapautuvat ja sitä kautta hajoavat liukoisiksi substraateiksi, joita mikrobit voivat käyttää kasvuunsa. Tässä ohjelmassa liukoisen hapen pitoisuuden

laskeminen suoritetaan välillisesti biomassan kasvun ja substraattien vapautumisen kautta. Taulukon 9 kaavassa liukoisen hapen kerroin autotrofisen biomassan kasvulle on teoreettinen hapen tarve ammoniumtypen hapettumiselle nitraatiksi. (Henze, 2002)

Liukoisen hapen lisäksi liukoinen nitraatti S_{NO} toimii aktiivilieteprosessissa elektronin vastaanottajana. Nitraatti muodostuu autotrofisen biomassan aerobisen kasvun aikana ja sitä kuluu heterotrofisen biomassan anoksisessa kasvussa. Nitraattia muodostuu ammoniumtypen hapettumisessa ja kuluu sen pelkistyessä typpikaasuksi. Ohjelmassa ei huomioida sitä, että ammoniumtyyppi ei hapetu suoraan nitraatiksi vaan nitriitti toimii välimuotona. Denitrifikaatioprosessissa nitraatti pelkistyy nitriitin kautta typpikaasuksi, mutta tätäkään välivaihetta ei oteta simuloinnissa huomioon. Yksinkertaistamisen vuoksi nitriittiä ei huomioida ohjelmassa ollenkaan. Ohjelmassa ei ole huomioitu sitä, että nitraattia kuluu biomassan mädäntymisessä. (Henze, 2002)

S_{NH} kuvaa liukoista ammoniumtyyppiä, joka koostuu ionisoidusta NH_4^+ sekä epäionisoidusta ammoniumista eli ionisoitumattomasta ammoniakista NH_3 . Ammoniakin vaikutus neutraalilla pH-alueella on vähäinen, joten ohjelmassa on huomioitu vain ammoniumtypen reaktiot. Sitä syntyy liukoisen biohajoavan orgaanisen typen ammonifikaation kautta.

Kuvassa 37 on kuvattu heterotrofisten ja nitrifioivien bakteerien prosesseja ja sitä, miten jäteveden eri parametrit reagoivat. Nitrifikaatiobakteerit tarvitsevat kasvaakseen ammoniumtyyppiä ja happea ja tuotteena syntyy nitraattia. Kuollessaan nitrifikaatiobakteerit hajoavat inertiksi kiintoaineeksi ja hitaasti hajoavaksi kiintoainesubstraatiksi. Heterotrofiset bakteerit kasvavat hapen ja liukoisen substraatin avulla. Niille käy kuollessa samoin kuin nitrifioiville bakteereille.



Kuva 37. Biologisessa puhdistuksessa heterotrofisten ja nitrifioivien bakteerien prosessit. (Henze)

8.2 Simulointi

Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla biologista prosessia voidaan säätää muuttamalla nitraatti- ja palautuslietekierrätyksen määrää, ilmastettujen lohkojen määrää, lieteikää, kalkin syöttömäärää ja esiselkeytetyn veden määrää. Kalkin syöttömäärä vaikuttaa ilmastusaltaiden pH-arvoon. Esiselkeytetyn veden johtamisella ilmastukseen säädetään sinne johdettavaa ravinnekuormaa, koska esiselkeytyksen aikana lietteeseen sitoutuu fosforin lisäksi kiintoainetta ja ravinteita.

Simulointiohjelmalla tutkittiin ensin mitoitusvirtaamapäivän tiedoilla hapellisten lohkojen määrän vaikutusta talviolosuhteissa. Hapensyöttö ilmastusaltaille on suurin yksittäinen sähkönkulutuskohde Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla, minkä takia simuloinnilla tutkittiin, tarvitaanko hapellisia lohkoja talvisin neljä.

Talven mitoitusvirtaamapäivän optimoinnin jälkeen simulointiohjelmalla vertailtiin huippuvirtaamavuorokauden biologista prosessia kahdella eri ajotavalla. Tarkoituksena oli selvittää miten esisaostus vaikuttaa biologiseen prosessiin ja mikä olisi paras ajotapa huippuvirtaamille. Käytetyt ajotavat ovat nimeltään biologinen ravinteidenpoisto ja kemiallinen ajotapa. Biologisen ravinteidenpoiston ajotavalla 50 % ilmastusaltaille tulevasta virtaamasta on esikäsiteltyä jätevettä ja 50 % esiselkeytettyä jätevettä. Kemiallisella ajotavalla ilmastusaltaille johdetaan vain esikäsiteltyä jätevettä.

ASM-ohjelmaan syötettiin vuorokauden tuntitiedot tulevan ja esiselkeytetyn veden virtaamista, nitraattikierrätyksen virtauksesta, palautuslietteen virtauksesta, lieteiästä, veden lämpötilasta ja liukoisen hapen pitoisuudesta. Tämän jälkeen määritettiin tulevan veden ja esiselkeytetyn veden liukoisten ja kiinteiden komponenttien pitoisuudet erikseen. Liukoisia komponentteja ovat happi, inertti-COD, substraatti-COD, ammoniumtyppi, typpikaasu, nitraattityppi ja alkaliniteetti. Kiinteässä olomuodossa olevia komponentteja ovat inertti-COD, substraatti-COD, heterotrofinen COD, varastoitunut COD, nitrifioiva COD ja kokonaiskiintoainepitoisuus.

Ohjelmaan rakennettiin prosessikaavio vastaamaan Hermanninsaaren puhdistamon todellista tilannetta. Anoksisia lohkoja on 3-5 ja ilmastettuja lohkoja 2-4. Ilmastetut lohkot 6 ja 7 ovat niin suuria, että molemmat lohkot jaettiin kahteen osaan. Simulointi käsittää yhden lohkon täysin sekoittuneeksi eli ideaalireaktoriksi. Ilmastusaltaiden suuresta koosta johtuen jätevedellä on merkittävä viipymä näissä altaissa, joten jakamalla ohjelmassa lohkot useammaksi reaktoriksi saadaan todenmukaisempi tulppavirtausreaktoria muistuttava tilanne.

8.2.1 Mitoitusvirtaamavuorokausi

Ohjelmaan syötettiin talvisen 13 000 m³/d virtaaman päivän tiedot, jotka ovat nähtävissä taulukoissa 10 ja 11. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla on kaksilinjainen aktiivilieteprosessi, mutta simuloinnissa virtaamat laskettiin vain yhdelle linjalle. Tilanne nimettiin 1A:ksi. Simulointiohjelma iteroi 50 kierrosta

parametreja ja tuloksena saadaan kuvaajia liukoisesta substraatti-COD:stä, ammoniumista ja nitraatista sekä kiintoainesubstraatti-COD:stä, heterotrofisesta COD:stä ja varastoituneesta COD:stä. Lohkot 1-5 olivat anoksisia ja lohkot 6 ja 7 olivat hapellisia ja näissä liukoisen hapen pitoisuus oli vakio.

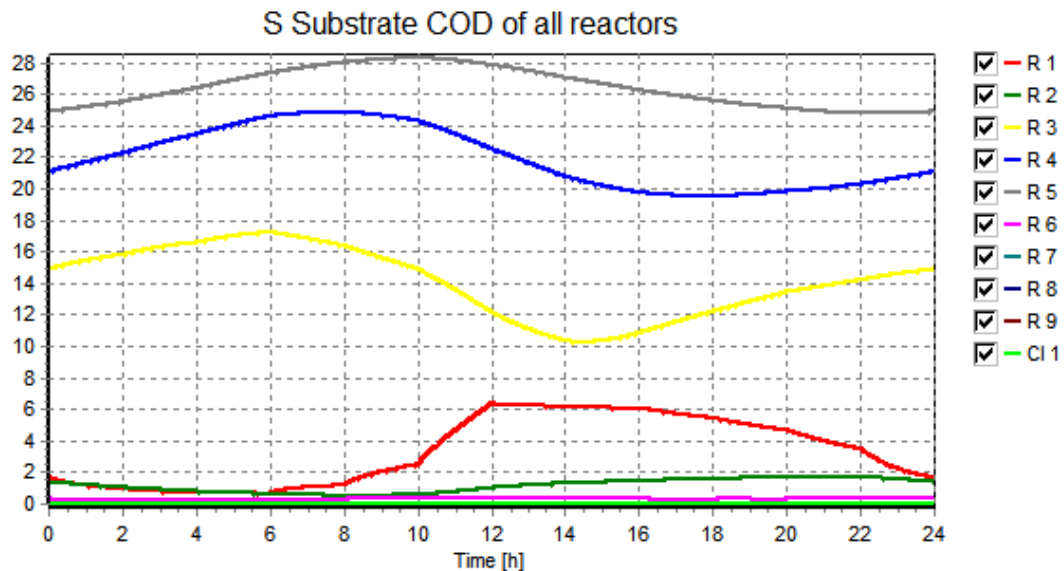
Taulukko 10. Mitoitusvirtaamavuorokauden simuloinnin parametrit.

| Säädetyt parametrit | |
|--|-----|
| Tulevan jäteveden virtaus m ³ /h | 268 |
| Esiselkeytetyn jäteveden virtaus m ³ /h | 180 |
| Palautusliete m ³ /h | 400 |
| Kierrätysliete m ³ /h | 600 |
| Lieteikä d | 16 |
| Liukoisen hapen pitoisuus mg/l | 2 |
| Lämpötila °C | 8 |

Taulukko 11. Mitoitusvirtaamavuorokauden simuloinnin virtaamien tiedot.

| Virtaamien pitoisuudet | | | |
|------------------------------|------|------------------------------|-------|
| Tuleva jätevesi | | Esiselkeytetty vesi | |
| Liukoiset komponentit mg/l | | Liukoiset komponentit mg/l | |
| Happi | 2 | Happi | 2 |
| Inertti COD | 41.2 | Inertti COD | 15 |
| Substraatti COD | 69 | Substraatti COD | 25 |
| NH ₄ ⁺ | 42 | NH ₄ ⁺ | 35 |
| Kiinteät komponentit mg/l | | Kiinteät komponentit mg/l | |
| Inertti COD | 138 | Inertti COD | 50 |
| Substraatti COD | 380 | Substraatti COD | 137.5 |
| Heterotrofinen COD | 62.1 | Heterotrofinen COD | 22.5 |
| Kiintoaine | 490 | Kiintoaine | 130 |

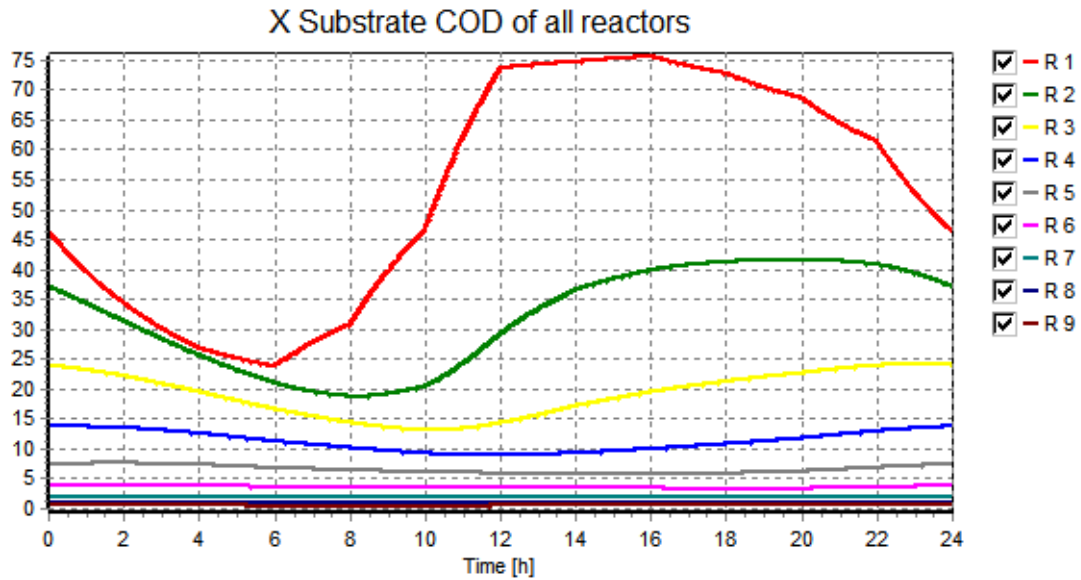
Kuvassa 38 on vuorokauden aikana tapahtuva vaihtelu liukoiselle substraatti-COD:lle. Jokaiselle reaktorille eli ilmastusaltaan lohkolle on omat vaihtelunsa. Reaktoreille käytetään kuvaajissa lyhennettä R ja jälkiselkeyttimestä termiä Cl. Reaktorin 9 ja jälkiselkeyttymisen kuvaajat ovat useassa kuvaajassa lähes samat, joten ne ovat päällekkäin ja R9 kuvaajaa ei tämän takia näy.



Kuva 38. Mitoitusvirtaamavuorokauden liukoinen substraatti-COD ilmastusaltaan lohkoissa tilanteessa 1A (mg/l).

Liukoista substraattia vapautuu solukuoleman yhteydessä sekä kiintoainemuotoisen substraatin hydrolysoituessa. Tämän takia liukoinen substraatti-COD eli $S_{\text{subst COD}}$ kasvaa järjestyksessä R1-R5. Lohkossa R1 pitoisuudet kasvavat aamupäivän aikana ja laskevat yöksi, mikä johtuu virtaaman vuorokausivaihtelusta. Virtaaman vuorokausivaihtelun merkitys pienenee samassa järjestyksessä. Liukoinen substraatti-COD laskee hapellisissa lohkoissa R6-R9 pieneksi. Hapellisissa lohkoissa COD hapettuu ensin ja vasta sen jälkeen ammoniumtyppi. Tämän takia on tärkeää, että ennen hapellisia lohkoja liukoinen COD on kulutettu loppuun. Anoksisten lohkojen asetettu määrä on tämän kuvaajan perusteella sopiva, koska mikrobit saavat käytettyä COD:n loppuun, joten sitä ei tarvitse hapettaa ilmastetuissa altaissa vedeksi ja hiilidioksidiksi. Tämä veisi hapellista tilaa nitrifikaatioprosessilta ja vaatisi ylimääräistä energiaa ilmastuksen kautta.

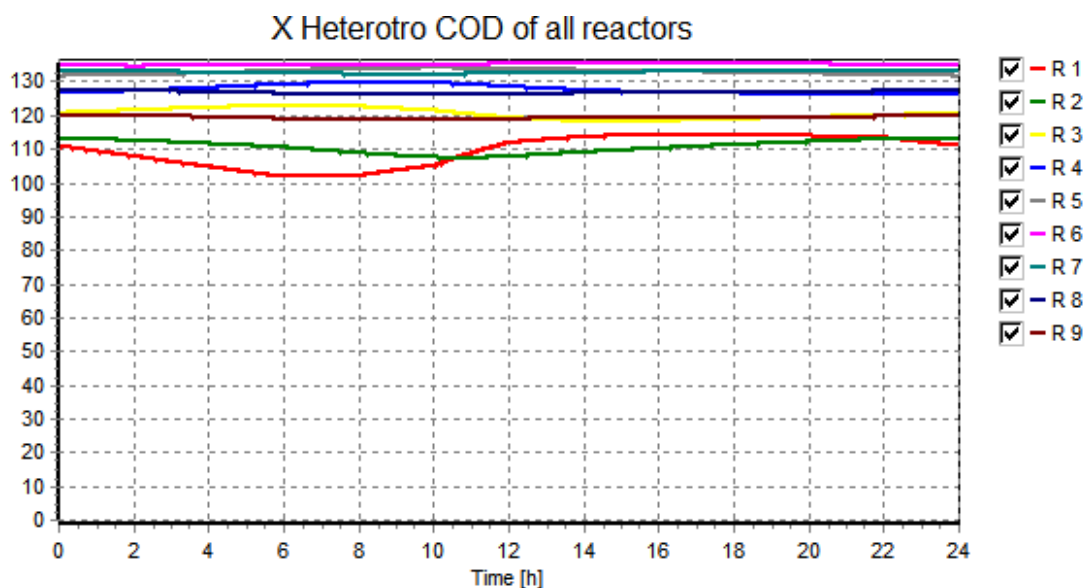
Kuvassa 39 on esitetty kiintoainemuotoisen substraatti-COD:n vaihtelut ilmastusaltaan eri lohkoissa. Tulevassa jätevedessä substraatti-COD on kiinteänä, mutta bakteerit eivät pysty hyödyntämään kiintoainemuotoista substraatti-COD:tä. Sen on ensin hydrolysoitettava, jotta substraatti-COD pystyy kulkeutumaan bakteerien sisälle.



Kuva 39. Mitoitusvirtaamavuorokauden kiintoaine substraatti-COD tilanteessa 1A (mg/l).

Kiintoainesubstraatti-COD:n pitoisuudet lohkoissa R1-R3 seuraavat tulevan virtaaman vuorokausivaihtelua, jonka vaikutus pienenee huomattavasti samassa järjestyksessä. Lohkojen R4-R9 kiintoaine substraatti-COD:n pitoisuudet pysyvät tasaisina ja laskevat lohkoissa R4-R9. Kiintoainesubstraatti-COD hydrolysoituu järjestyksessä R1-R9.

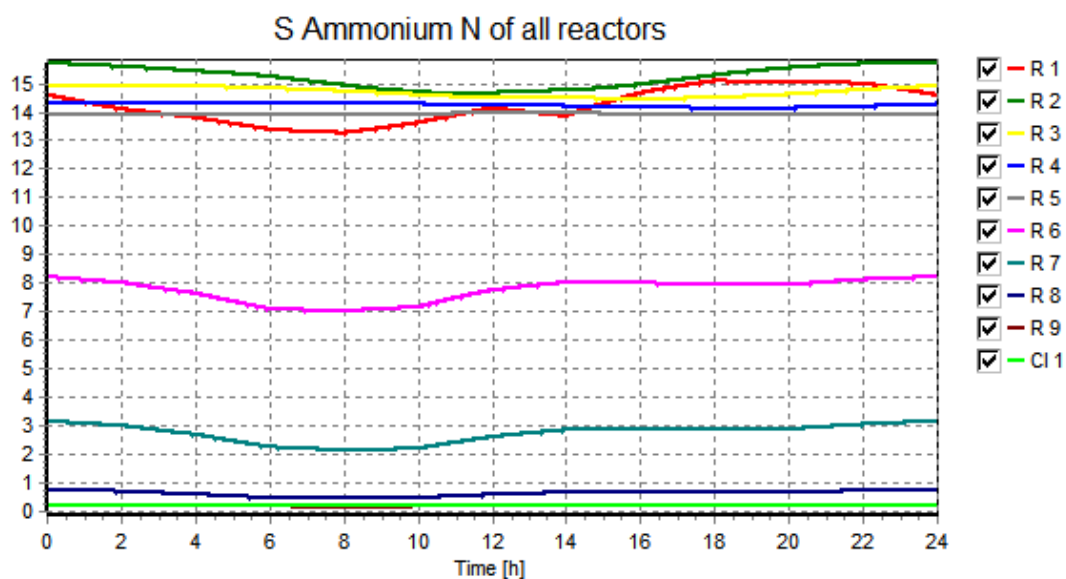
Kuvassa 40 näkyy heterotrofisten bakteerien pitoisuus muunnettuna COD-pitoisuudeksi.



Kuva 40. Mitoitusvirtaamavuorokauden heterotrofisten bakteerien määrä COD:nä tilanteessa 1A (mg/l).

Heterotrofisten bakteerien pitoisuus pysyy hyvin tasaisena 100–130 mg/l eri lohkoissa. Vuorokausivaihtelut näkyvät eniten lohkoissa R1 ja R2, mutta niissäkin hyvin maltillisesti. Heterotrofisten bakteerien kasvu hidastuu hapellisissa lohkoissa R5-R9. Tämä johtuu siitä, että liukoisen substraatin määrä pienenee prosessin edetessä. Hapellisissa lohkoissa on liian vähän liukoista substraatti-COD:tä heterotrofisille bakteereille, joten niiden solukuolleisuus ylittää kasvun.

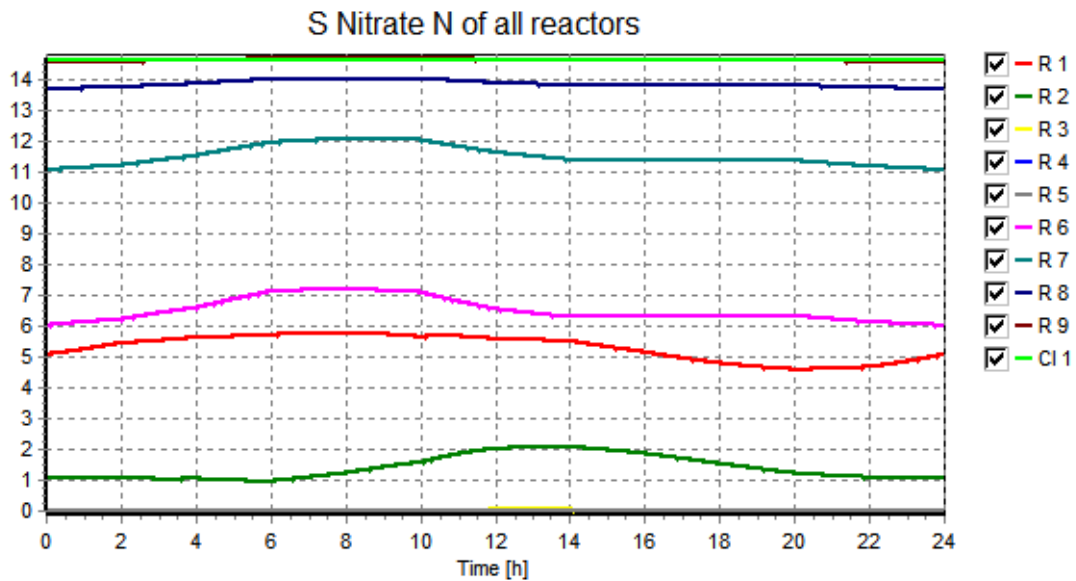
Kuvassa 41 on esitetty liukoisen ammoniumtypen pitoisuudet mitoitusvirtaamavuorokautena tilanteessa 1A.



Kuva 41. Mitoitusvirtaamavuorokauden ammoniumtyppipitoisuudet tilanteessa 1A (mg/l).

Lohkojen R1-R5 ammoniumpitoisuudet ovat tasaisesti korkeita, koska tulevassa jätevedessä typpi on ammoniumin muodossa. Ensimmäiset reaktorit ovat anoksisia lohkoja, joissa nitrifikaatio ei tapahdu. Lohkossa 6 eli reaktoreissa R6 ja R7 nitrifikaatioprosessi alkaa, koska ammoniumtyppipitoisuus laskee selvästi. Lohkossa 7 eli reaktoreissa R8 ja R9 ammoniumtypen pitoisuus laskee maltillisemmin, joten suurempi osa ammoniumista poistetaan lohkoissa 6. Jälkiselkeytysaltaassa pitoisuus on lähes sama kuin viimeisessä reaktorissa R9 eli lähtevän jäteveden ammoniumtyppipitoisuus on 0,2 mg/l.

Kuvasta 42 nähdään liukoisen nitraatin pitoisuudet eri reaktoreissa.



Kuva 42. Mitoitusvirtaamavuorokauden nitraattipitoisuudet tilanteessa 1A (mg/l).

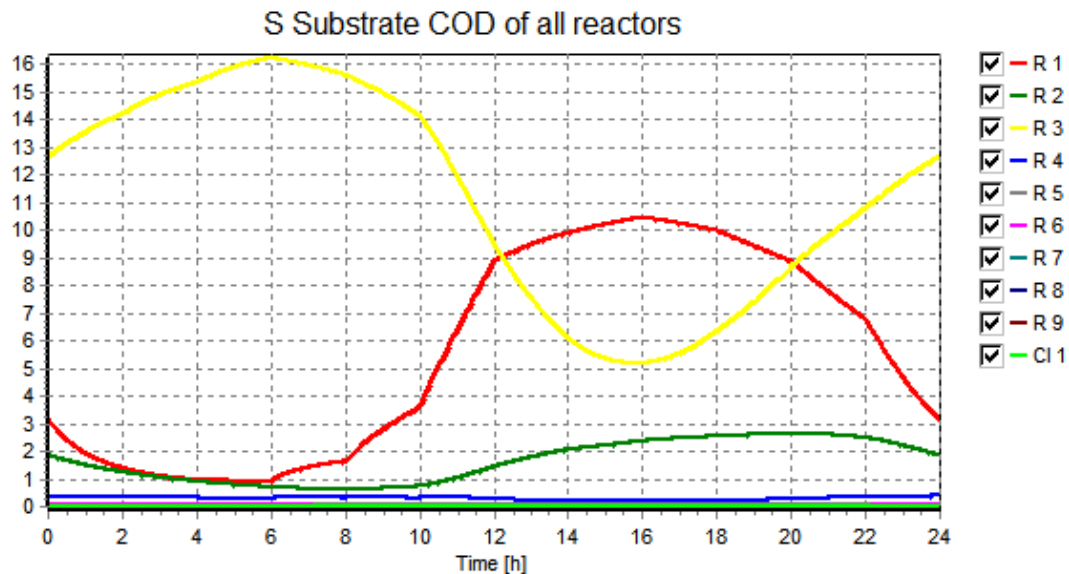
Nitraattityppeä ei ole tulevassa jätevedessä vaan ammoniumtyppi reagoi nitraatiksi nitrifikaation kautta. Tämän takia nitraatin pitoisuus nousee hapellisissa lohkoissa R6-R9. Anoksisissa lohkoissa nitraatti pelkistyy typpikaasuksi, minkä takia pitoisuus laskee lohkoissa R1-R5. Nitraatti kierrätetään reaktorista 9 ensimmäiseen lohkoon R1:een. Jälkiselkeytyksestä lähtevän veden nitraattipitoisuus on 14,5 mg/l.

1A tilanteen simuloidut arvot eri parametreille vaikuttavat luotettavilta, koska lähtevän veden pitoisuudet lähes vastaavat tavallista puhdistustulosta talvisena mitoitusvirtaamavuorokautena. Lähtevän veden kokonais-COD-pitoisuus on kaikkien eri COD-parametrien summa. Kaikkia eri parametrejä ei ole esitetty, mutta substraatti-COD:n pitoisuuksien vaihtelut ovat uskottavia. Lähtevän jäteveden ammoniumtypen pitoisuus on noin 0,1 mg/l ja nitraattipitoisuus (14,5 mg/l) on noin 4,5 mg/l korkeampi kuin todellisuudessa. Hapellinen tilavuus ei ole ollut simuloinnissa riittävä nitrifikaatiolle ja ammoniumtypeä on jäänyt reagoimatta.

Tilanteessa 1B käytettiin samoja syöttötietoja kuin tilanteessa 1A, paitsi että lohkot 4 ja 5 vaihdettiin anoksisista sekoituslohkoista ilmastettuihin. Tällä pyritään selvittämään hapellisen tilavuuden nostamisen vaikutus nitrifikaation tehoon.

Hapellisten lohkojen määrän vaikutusta arvioitiin liukoisen substraatti-COD:n, kiinteän substraatti-COD:n, ammoniumtypen ja nitraattitypen pitoisuuksien vaihteluiden avulla. Nämä kuvaajat on esitetty seuraavana.

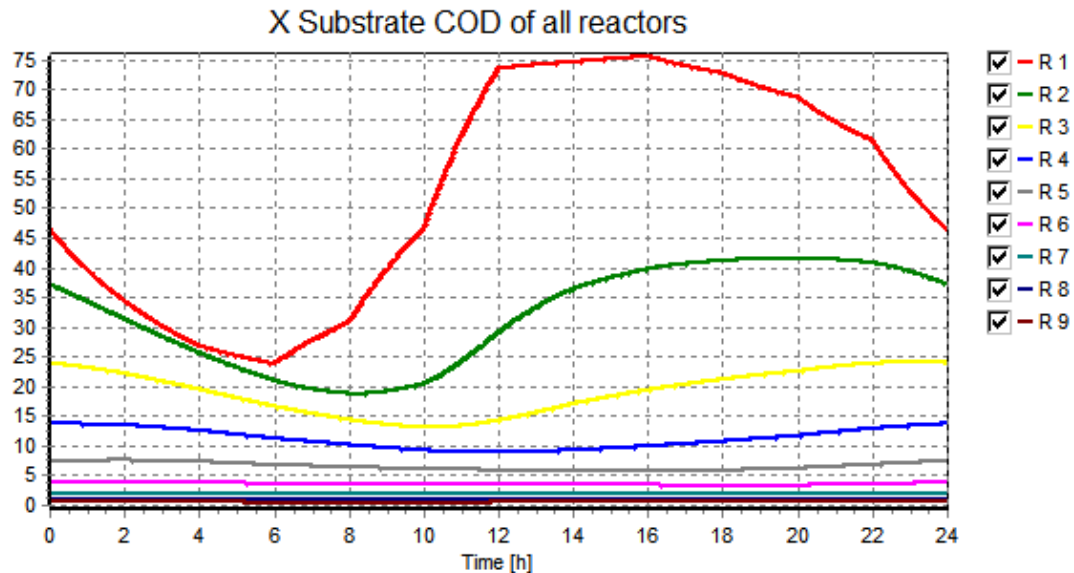
Kuvasta 43 näkyvät liukoisen substraatti-COD:n pitoisuudet eri reaktoreissa.



Kuva 43. Mitoitusvirtaamavuorokauden liukoisen substraatti-COD:n pitoisuudet tilanteessa 1B (mg/l).

Pitoisuudet heittelevät rajusti lohkoissa R1 kasvaen iltapäiväksi virtaaman ja palautuslietteen kasvun johdosta. Pitoisuus on enimmillään 10,5 mg/l, kun tilanteessa 1A pitoisuus on korkeimmillaan vain 6 mg/l. Lohkon R2 pitoisuus vaihtelee vain 1-3 mg/l välillä ja kasvutrendi vuorokauden mukaan on samanlainen kuin lohkoissa R1. Lohkoissa R3 pitoisuus nousee merkittävästi pitoisuudesta 5 mg/l:n pitoisuuteen 16 mg/l:n ja vaihtelu on päinvastaista kuin lohkoissa R1, mutta hieman maltillisempaa. R4:n pitoisuus tippuu tasolle 0,3 mg/l ja lohkojen R5-R6 pitoisuus laskee edelleen, kunnes lopulta pitoisuus on jälkiselkeytyksessä 0,01 mg/l. Tilanteessa 1A liukoisen substraatti-COD:n pitoisuudet nousivat lohkoissa R4 ja R5 ja maksimipitoisuus oli 28 mg/l. Tällöin bakteereilla on ollut huomattavasti enemmän käyttökelpoista ravintoa saatavilla.

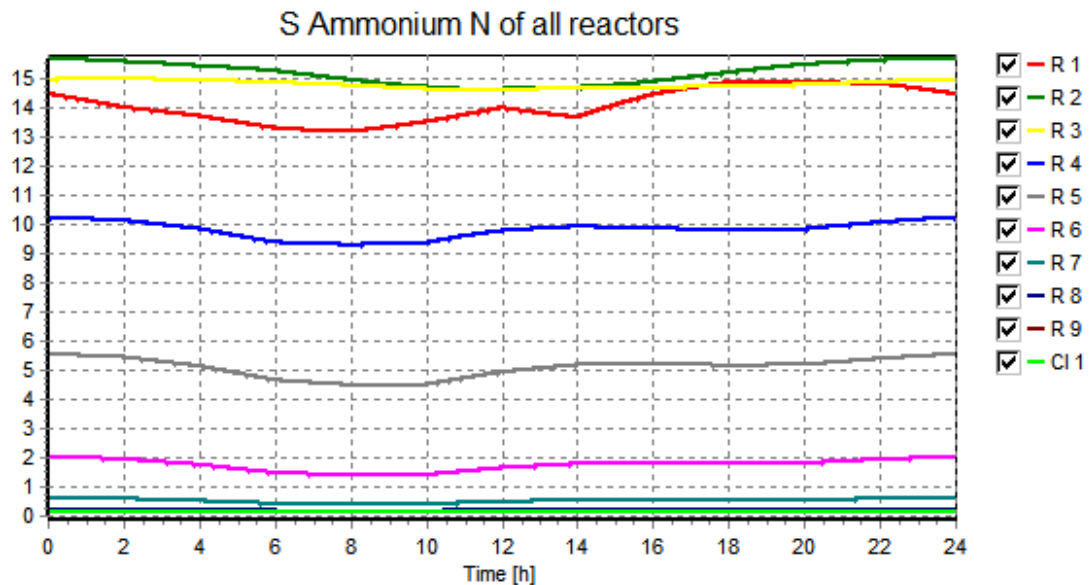
Kuvasta 44 nähdään kiintoaine substraatti-COD:n pitoisuuksien mitoitustilanteen aikaiset vaihtelut tilanteessa 1B.



Kuva 44. Mitoitusvirtaamavuorokauden kiintoaine substraatti-COD:n pitoisuudet tilanteessa 1B (mg/l).

Lohkossa R1 on selkeästi korkein pitoisuus kiintoaine substraatti-COD:tä (25–75 mg/l) ja sen vaihtelu seuraa virtaaman vuorokausirytmää. Lohkossa R2 pitoisuuksien vaihtelu tapahtuu välillä 20–40 mg/l. R3:n pitoisuuksien vaihtelu on maltillisempaa välillä 14–25 mg/l. R4-lohkossa vaihtelu tasoittuu edelleen ja pitoisuudet laskevat tasolle 8–12 mg/l. Lohkoissa R5–R9 pitoisuudet pysyvät tasaisina ja laskevat siirryttäessä lohkoissa eteenpäin. Kiintoainesubstraatti-COD:n pitoisuuksien vaihtelut ovat identtiset tilanteissa 1A ja 1B.

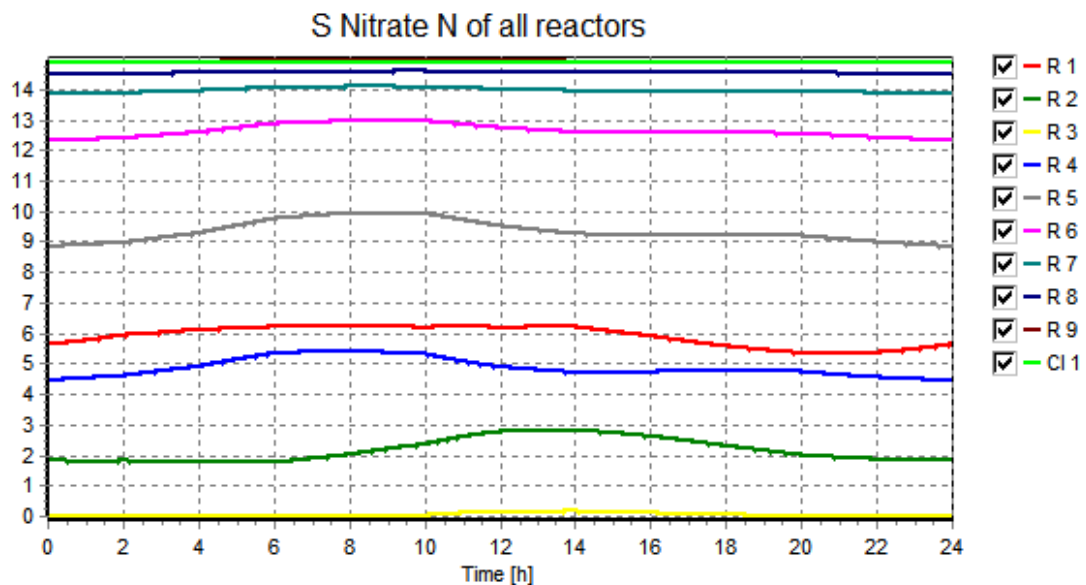
Liukoisien ammoniumtyypen pitoisuuksien vaihtelut tilanteessa 1B eri lohkoissa ovat nähtävissä kuvassa 45.



Kuva 45. Liukoisen ammoniumtypen pitoisuudet mitoitusvirtaamavuorokauden aikana tilanteessa 1B (mg/l).

Nitrifikaatioprosessi tarvitsee happea, minkä takia ammoniumtypen pitoisuudet pysyvät lähes tasaisina anoksisissa lohkoissa R1-R3. Pitoisuudet vaihtelevat välillä 13–15,5 mg/l. Poistoprosessi alkaa lohkoissa R4 ja pitoisuus pienenee R9:ään eli lohkoon 7 asti. Jälkiselkeytyksen pitoisuus on noin 0,13 mg/l, joka on parempi puhdistustulos kuin tilanteen 1A pitoisuus 0,2 mg/l.

Kuvassa 46 on esitetty liukoisen nitraattipitoisuudet mitoitusvirtaamavuorokauden aikana tilanteessa 1B.



Kuva 46. Liukoisen nitraattitypen pitoisuudet mitoitusvirtaamavuorokauden aikana tilanteessa 1B (mg/l).

Nitraatti muodostuu nitrifikaation kautta ja se poistetaan vedestä denitrifikaatiolla typpikaasuksi. Vaihtelut ovat hyvin samanlaisia kuin tilanteessa 1A. Erona kuitenkin se, että tilanteessa 1B lohkot R4 ja R5 ovat hapellisia, jolloin nitrifikaatio alkaa jo näissä lohkoissa. Lähtevän nitraatin pitoisuus on molemmilla ajotavoilla 14,5 mg/l.

Tilanteiden 1A ja 1B puhdistustulokset ovat hyvin samantasoiset. Hapellisten lohkojen määrä vaikuttaa eniten lähtevän veden ammoniumtyppipitoisuuteen. Ilmastamalla kaikki neljä viimeistä lohkoa hapellisiksi saavutetaan paremmat tulokset. Tämän perusteella voidaan todeta, että Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla on suositeltavaa jatkaa talvisin ajotapaa, jossa ilmastetaan lohkot 4-7.

8.2.2 Huippuvirtaamavuorokausi

Huippuvirtaamavuorokausina biologista puhdistusprosessia voidaan ohjata kahdella eri tavalla. ”Biologisella ravinteidenpoisto” -ajotavalla osa jätevedestä johdetaan esiselkeytyksen ohi ja osa esiselkeytyksen kautta suoraan ilmastusaltaille.

Ilmastusaltaan kapasiteetin ylittävä jätevesimäärä ohitetaan esiselkeytyksen jälkeen vesistöön.

”Tehostettu kemiallinen käsittely” -ajotavalla tai toiselta nimeltään tulva-ajotavalla ilmastusaltaalle johdetaan sen kapasiteetin mukainen jätevesi ilman esiselkeytystä ja esiselkeytetty vesi johdetaan biologisen prosessin ohi vesistöön. Tämän ajotavan ideana on lisätä ilmastusaltaalle johdettavaa ravinnekuormaa, joka laimenee hulevesivirtaamista johtuen. Näitä kahta eri ajotapaa vertaillaan samanlaisilla simulointiolosuhteilla. Simuloinnissa vertaillaan eri ajotavoilla liukoisen ja kiintoainesubstraatti-COD:n sekä liukoisen ammonium- ja nitraattitypen pitoisuuksien vaihtelua eri ilmastusaltaan lohkoissa.

Huippuvirtaamavuorokauden aikana viipymät eri lohkoissa lyhenevät ja tämän takia vuorokausivaihtelut ovat havaittavissa. Oletettavasti pienempien viipymien takia biologinen prosessi on herkempi häiriötekijöille. Viipymäaikojen takia bakteereilla ei ole yhtä paljon aikaa reagoida ja poistaa tyyppä jätevedestä. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon ilmastusaltaisiin johdetaan tulevaa ja esiselkeytettyä jätevettä ja näiden eri virtaamien suhdetta säädetään vedenjakoaltaassa. Ilmastusaltaan kapasiteetin ylittävä jätevesi johdetaan biologisen prosessin ohi vesistöön, jotta viipymät eivät laskisi liikaa. Ilman ohituksia ilmastusaltaan biomassaa huuhtoutuisi helposti jälkiselkeytysaltaasta vesistöön. Tällöin typenpoistoon tarvittava bakteerimassa pitäisi elvyttää, mikä veisi jopa useita viikkoja.

8.2.2.1 ”Biologinen ravinteidenpoisto” -ajotapa

”Biologinen ravinteidenpoisto ” -ajotavalla ilmastusaltaalle johdetaan sekä tulevaa, että esiselkeytettyä jätevettä. Tämän ajotavan huippuvirtaamavuorokauden parametrit on esitetty taulukossa 12. Tätä ajotapaa on käytetty Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla aikaisempien vuosien huippuvirtaamien aikana.

Taulukko 12. Huippuvirtaamavuorokauden ”biologinen ravinteidenpoisto” -ajotavan simuloinnin parametrit.

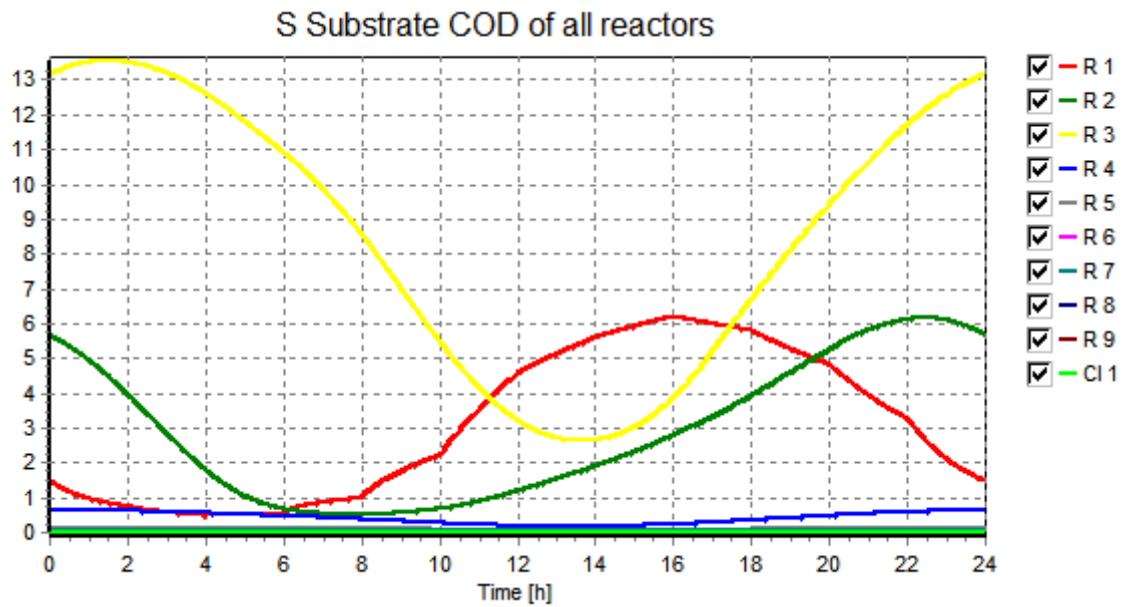
| Säädetyt parametrit | |
|--|-----|
| Tulevan jäteveden virtaus m ³ /h | 500 |
| Esiselkeytetyn jäteveden virtaus m ³ /h | 500 |
| Palautusliete m ³ /h | 675 |
| Kierrätysliete m ³ /h | 500 |
| Lieteikä d | 16 |
| Liukoisen hapen pitoisuus mg/l | 2 |
| Lämpötila °C | 8 |

Taulukkoon 13 on listattu simuloinnissa ilmastusaltaalle johdettavien virtaamien pitoisuudet, jotka laskettiin Baden *et al* julkaiseman oppaan mukaisesti. Esiselkeytetyn veden pitoisuudet on laskettu PAX-laitoskokeiden näytepäivien tuloksista.

Taulukko 13. Hulevesivirtaamapäivän ”biologinen ravinteidenpoisto” -ajotavan ilmastusaltaalle johdettavien simulointivirtaamien pitoisuudet.

| Virtaamien pitoisuudet | | | |
|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|------|
| | | | |
| Tuleva jätevesi | | Esiselkeytetty vesi | |
| Liukoiset komponentit mg/l | | Liukoiset komponentit mg/l | |
| Happi | 2 | Happi | 2.0 |
| Inertti COD | 19.8 | Inertti COD | 3.0 |
| Substraatti COD | 33 | Substraatti COD | 5.0 |
| NH ₄ ⁺ | 13 | NH ₄ ⁺ | 13.0 |
| Kiinteät mg/l | | Kiinteät komponentit mg/l | |
| Inertti COD | 66 | Inertti COD | 9.9 |
| Substraatti COD | 181.5 | Substraatti COD | 27.2 |
| Heterotrofinen COD | 29.7 | Heterotrofinen COD | 4.5 |
| Kiintoaine | 204 | Kiintoaine | 50.0 |

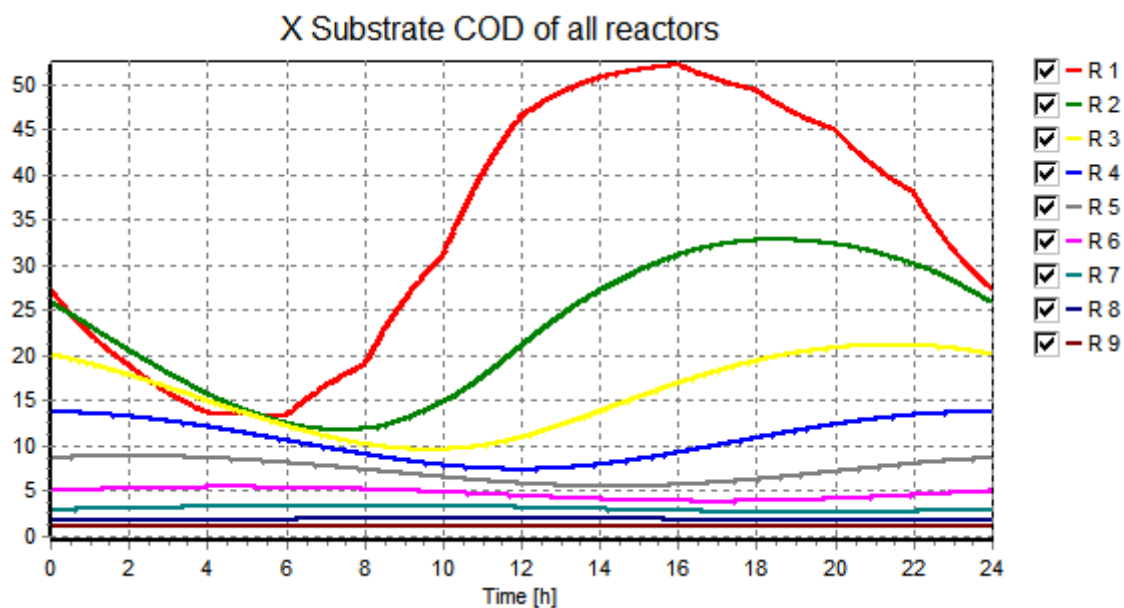
Kuvista 47, 48, 49 ja 50 näkyvät simuloinnin tulokset liukoiselle ja kiinteälle substraatti-COD:lle sekä liukoisille ammonium- ja nitraattityypelle.



Kuva 47. Huippuvirtaamavuorokauden liukoisen substraatti-COD:n pitoisuudet (mg/l)

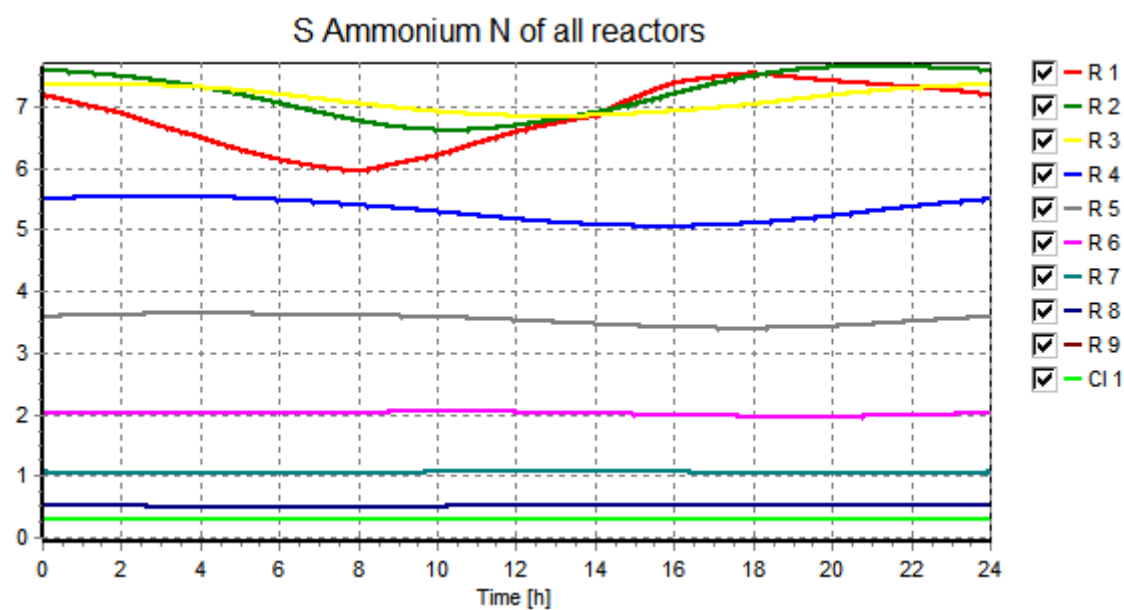
Liukoisen substraatti-COD:n pitoisuus laskee huomattavasti hulevesivirtaamasta ja ajotavasta johtuen. Pitoisuus kasvaa kiintoainesubstraatti-COD:n liuetessa lohkoissa 2 ja 3.

Kuvassa 48 on esitetty kiinteän substraatti-COD:n pitoisuuksien vaihtelut huippuvirtaamavuorokauden aikana.



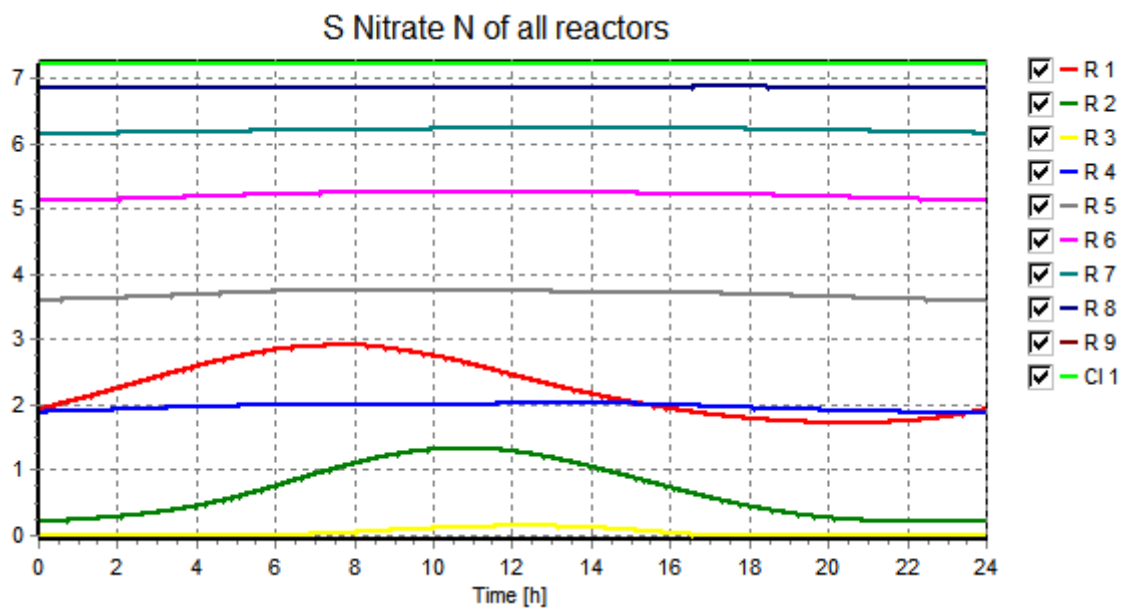
Kuva 48. Huippuvirtaamavuorokauden kiintoainesubstraatti-COD:n pitoisuudet (mg/l)

Kiintoainesubstraatti-COD:n vaihtelut eri lohkoissa ovat hyvin samankaltaiset kuin mitoitusvirtaamavuorokauden aikana. Erona on ainoastaan alhaisemmat pitoisuudet, jotka johtuvat hulevesien laimentavasta vaikutuksesta jätevedessä.



Kuva 49. Huippuvirtaamavuorokauden liukoisen ammoniumtypen pitoisuudet (mg/l)

Tulevan jäteveden ammoniumtyyppipitoisuudet ovat myös alhaiset johtuen hulevesien laimentavasta vaikutuksesta. Nitrifikaatio toimii tehokkaasti ja jälkiselkeytykseen lähtevän jäteveden pitoisuus on 0,2 mg/l. Ammoniumtypen pitoisuus laskee enää vähän lohkoissa 7, mikä kuvaa sitä, että nitrifikaation teho on heikompi lohkoissa 7 kuin lohkoissa 6.



Kuva 50. Huippuvirtaamavuorokauden liukoisen nitraattityypin pitoisuudet (mg/l)

Nitraatin pitoisuus laskee anoksisissa lohkoissa ja kasvaa hapellisissa typenpoiston reaktioiden mukaisesti. Lähtevän jäteveden nitraattipitoisuus on hieman yli 7 mg/l, joka on hyvä puhdistustulos. Denitrifikaatioprosessi on sopivasti mitoitettu tälle kuormalle, sillä lohkojen 2 ja 3 välissä tapahtuu vielä nitraatin poistoa ja lohkoissa 3 lähes kaikki nitraatti on reagoinut.

8.2.2.2 ”Tulva”-ajotapa

Tulva-ajotavalla ilmastusaltaille johdetaan vedenjakoaltaasta vain tulevaa jätevettä eli esiselkeytetty vesi johdetaan biologisen puhdistusprosessin ohi vesistöön. Huippuvirtaamien aikana tuleva jätevesi on laimeaa, joten se sisältää vähemmän orgaanisia ravinteita typenpoiston bakteereille. Esiselkeytyksessä jätevedestä sitoutuu ravinteita sekalietteeseen. Tulva-ajotavalla pyritään johtamaan ilmastusaltaille mahdollisimman paljon ravinteita, minkä takia ilmastusaltaaseen

johdetaan vain tulevaa jätevetä. Tämän ajotavan simuloinnin parametrit on esitetty taulukossa 14. Taulukkoon 15 on listattu simuloinnissa käytettyjen virtaamien pitoisuudet, jotka laskettiin Baden *et al* julkaiseman oppaan mukaisesti.

Taulukko 14. Huippuvirtaamavuorokauden tulva-ajotavan simuloinnin parametrit.

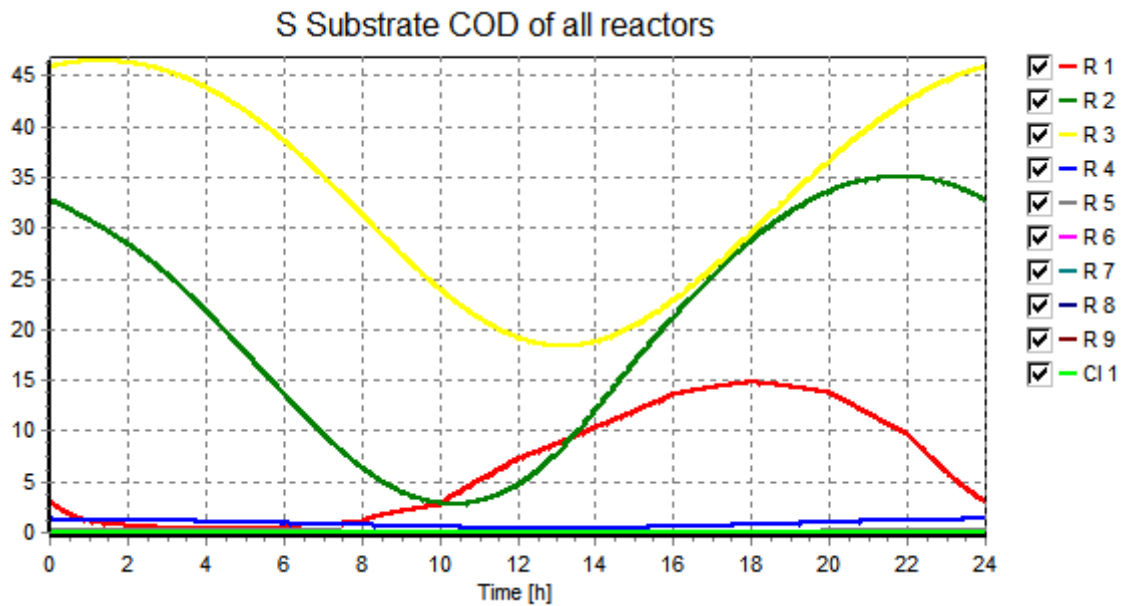
| Säädetyt parametrit | |
|--|-----|
| Tulevan jäteveden virtaus m ³ /h | 500 |
| Esiselkeytetyn jäteveden virtaus m ³ /h | 0 |
| Palautusliete m ³ /h | 375 |
| Kierrätysliete m ³ /h | 500 |
| Lieteikä d | 16 |
| Liukoisen hapen pitoisuus mg/l | 2 |
| Lämpötila °C | 8 |

Taulukko 15. Huippuvirtaamavuorokauden tulva-ajotavan simuloinnin ilmastusaltaille johdettavien virtaamien pitoisuudet.

| Virtaamien pitoisuudet | | | |
|------------------------------|-------|------------------------------|---|
| Tuleva jätevesi | | Esiselkeytetty vesi | |
| Liukoiset mg/l | | Liukoiset mg/l | |
| Happi | 2 | Happi | 0 |
| Inertti COD | 19.8 | Inertti COD | 0 |
| Substraatti COD | 33 | Substraatti COD | 0 |
| NH ₄ ⁺ | 13 | NH ₄ ⁺ | 0 |
| Kiinteät mg/l | | Kiinteät mg/l | |
| Inertti COD | 66 | Inertti COD | 0 |
| Substraatti COD | 181.5 | Substraatti COD | 0 |
| Heterotrofinen COD | 29.7 | Heterotrofinen COD | 0 |
| Kiintoaine | 204 | Kiintoaine | 0 |

Simuloinnin tulokset liukoiselle ja kiinteälle substraatti-COD:lle sekä liukoiselle ammonium- ja nitraattityypelle on esitetty kuvissa 51, 52, 53 ja 54.

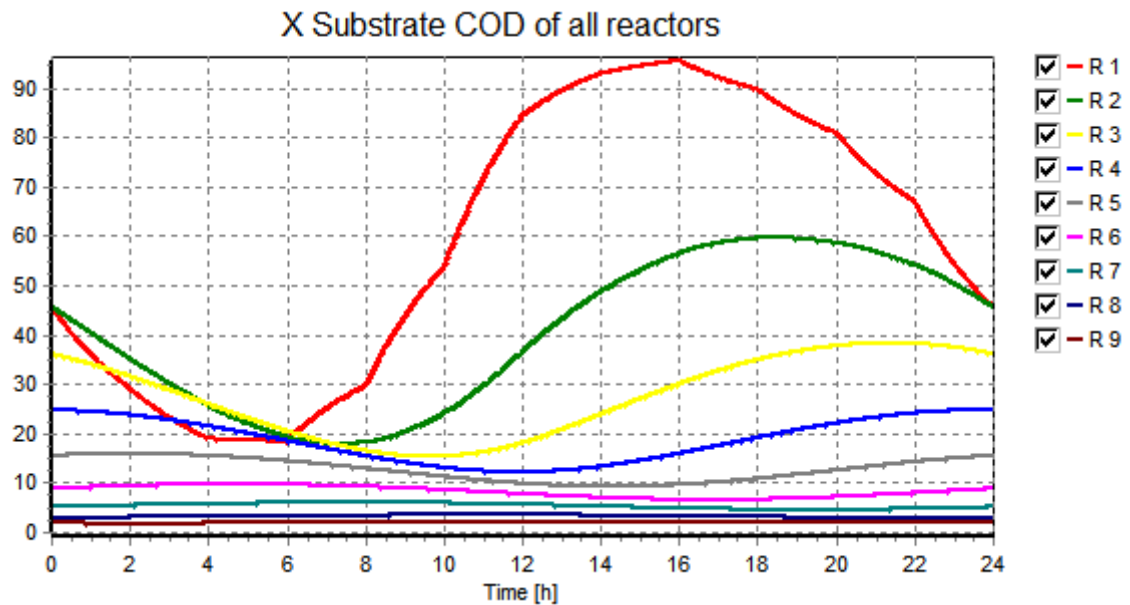
Kuvassa 51 on esitetty vuorokauden aikana tapahtuva vaihtelu liukoiselle substraatti-COD:lle.



Kuva 51. Huippuvirtaamavuorokauden liukoisen substraatti-COD:n pitoisuudet (mg/l)

Vuorokausivaihtelut ovat selkeitä kolmessa ensimmäisessä lohkoissa. Liukoista substraattia vapautuu solukuolemissa ja kiintoainesubstraatin hydrolysoitumisesta. Tämä selittää liukoisen substraatin kasvun anoksisissa lohkoissa R1-R3. Denitrifikaatioprosessi kuluttaa jäteveden liukoisen substraatin-COD, minkä takia hapellisissa lohkoissa R4-R9 pitoisuus on hyvin pieni ja vuorokausivaihtelun merkitys myös olematon. Tulva-ajotavalla liukoinen substraatti-COD:n pitoisuudet ovat lohkoissa R1-R3 huomattavasti korkeammat kuin ”biologisella ravinteidenpoisto” -ajotavalla. Korkeimmillaan pitoisuus on R3:ssa tulva-ajotavalla jopa 45 mg/l, kun ”biologisella ravinteidenpoistolla” maksimipitoisuus on vain 13 mg/l. Vuorokausivaihtelut ovat myös selvempiä ”tulva”-ajotavalla.

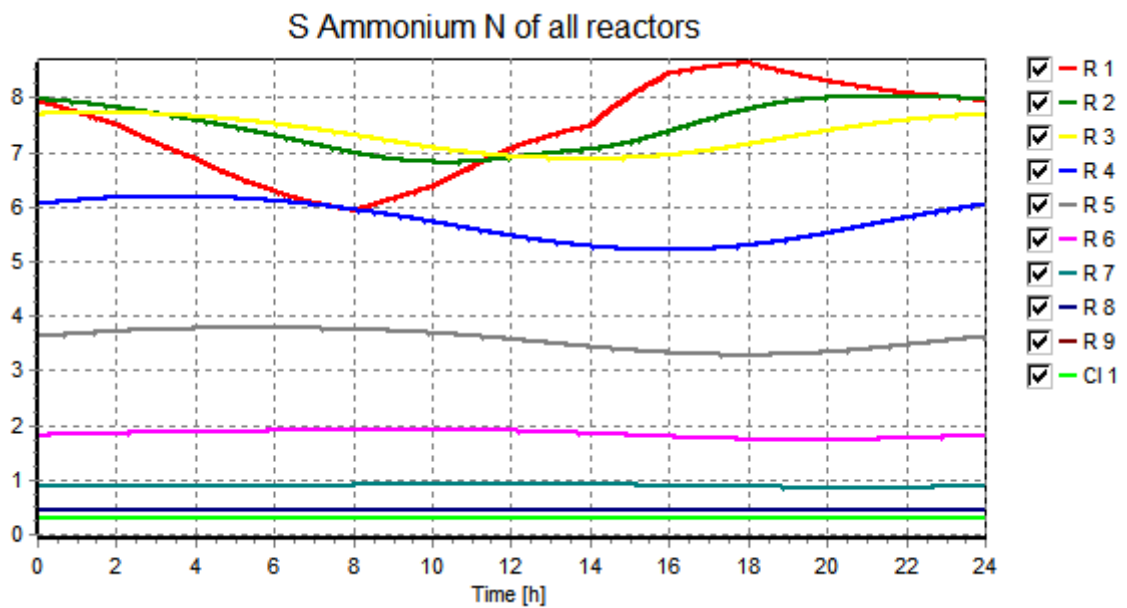
Kuvassa 52 on esitetty vuorokauden aikana tapahtuva vaihtelu kiintoainesubstraatti-COD:lle.



Kuva 52. Huippuvirtaamavuorokauden kiintoainesubstraatti-COD:n pitoisuudet (mg/l)

Kiintoainesubstraatti-COD:n vuorokausivaihtelut ovat hyvin samanlaiset molemmilla huippuvirtaama-ajotavoilla. Pitoisuudet ovat kuitenkin 40 mg/l korkeammat kuin ”biologinen ravinteidenpoisto” -ajotavalla.

Kuvasta 53 nähdään liukoisen ammoniumtypen pitoisuuksien vaihtelut.

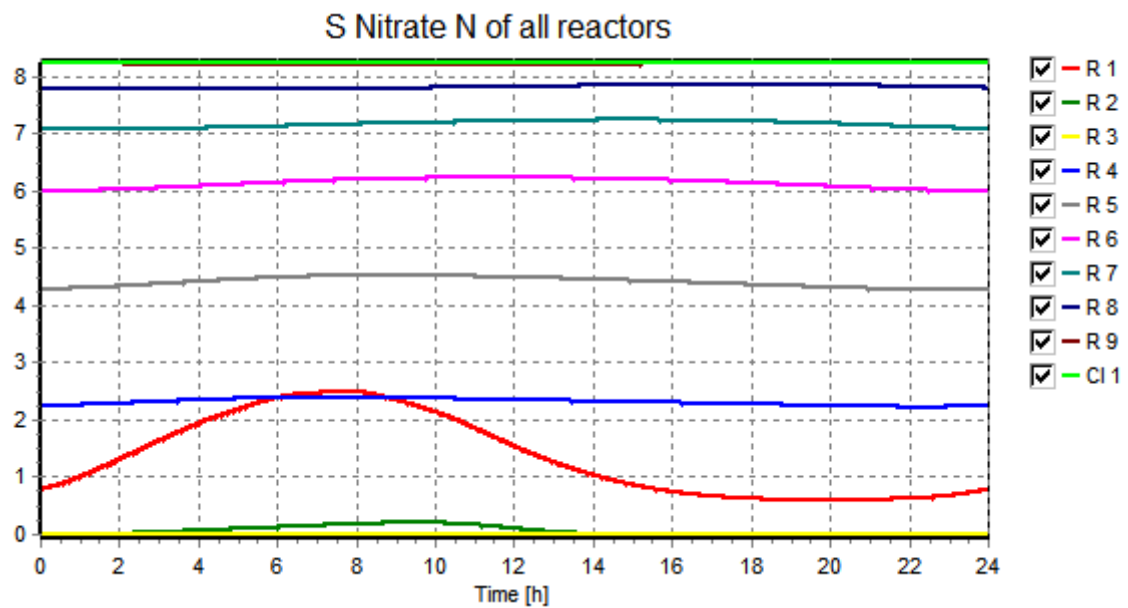


Kuva 53. Huippuvirtaamavuorokauden liukoisen ammoniumtypen pitoisuudet (mg/l)

Ammoniumtypen tuloksista huomataan, että nitrifikaatio tapahtuu tehokkaasti ja ilmatusaltaan kapasiteetti on riittävä. Tämä on havaittavissa siitä, että viimeisissä reaktoreissa eli lohossa 7 ammoniumtyppi on jo lähes kokonaan poistettu. Lähtevän ammoniumtypen pitoisuus on 0,13 mg/l. Sama puhdistustulos saadaan molemmilla huippuvirtaaman ajotavoilla.

Kuvassa 54 on esitetty huippuvirtaaman nitraattitypen pitoisuudet.

Nitraattipitoisuudet ovat alhaisemmat huippuvirtaamavuorokauden ajotavoilla kuin mitoitusvirtaaman. Lähtevän jäteveden nitraattipitoisuus tulva-ajotavalla on noin 8 mg/l, kun se on ”biologisella ravinteidenpoisto” -ajotavalla 7 mg/l. Pitoisuudet ovat lähes samat, koska simulointiohjelmalla ei saada tarkempia tuloksia.



Kuva 54. Huippuvirtaamavuorokauden liukoisen nitraattityypen pitoisuudet (mg/l)

9.3 Simuloinnin johtopäätökset

Riittävän typenpoiston kannalta oleellisinta on huippuvirtaamavuorokausina johtaa ilmastusaltaille vain kapasiteetin mukainen jätevesimäärä. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla hulevesivirtaamapäivinä ajotapana on käytetty ”biologista ravinteidenpoisto” -ajotapaa eli esiselkeytettyä vettä on johdettu ilmastusaltaisiin. Tätä ajotapaa verratessa ”tulva”-ajotapaan voidaan todeta, että typenpoiston kannalta ei ole merkittävää kumpaa ajotapaa käytetään. Substraatti-COD:n pitoisuudet vaihtelivat paljon näiden ajotapojen välillä eri lohkoissa, mutta ilmastusaltaan suuren kapasiteetin takia typenpoisto ei kärsinyt siitä. Simulointien perusteella havaittiin, että biologisen puhdistuksen rajoittava tekijä ei ole typenpoistoon tarvittava hiililähde vaan jälkiselkeytysaltan pinta-ala. Vaikka typenpoisto ei kärsisi, jos ilmastusaltaseen johdettaisiin suurempia määriä jätevettä kuin $1000 \text{ m}^3/\text{h}$, niin jälkiselkeytysaltaasta karkaisi kiintoainetta ja ravinteita vesistöön. Tämä johtuu siitä, että jälkiselkeytysaltaassa liete ei ehdi laskeutua pohjalle liian lyhyen viipymän ja liian suuren pintakuorman takia.

9. Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli selvittää esisaostuksen teho Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla ja tutkia riittäisikö se parantamaan huippuvirtaamakausien fosforipuhdistustulokset tiukemman lupaehdon mukaisiksi. Tämän lisäksi simulointiohjelmalla tutkittiin aktiivilieteprosessin erilaisia ajotapoja huippuvirtaamakausille.

Tutkimuksen aluksi vertailtiin neljän eri saostuskemikaalin fosforinpoistotehoa. Nämä olivat PAX-XL100, PAX-XL60, PIX-105 ja ALF-30. Näistä tehokkaimmin fosforia saosti PAX-XL100, joka saavutti annostuksella 100 g/m^3 fosforipitoisuuden $0,3 \text{ mg/l}$.

Laitosmittakaavan kokeissa PAX-XL100 saavutti fosforipitoisuudelle tason $1,3 \text{ mg/l}$ esiselkeytetyssä jätevedessä. Fosforinpoistoreduktio esiselkeytetyssä jätevedessä oli noin 85 %. Diplomityön aikana ei ollut huippuvirtaamakausia, joten esisaostuksen tehoa jouduttiin arvioimaan laskennallisesti käyttäen kevään 2012 virtaamatietoja. Keväällä 2012 tulevan jäteveden virtaamat olivat lumien sulamisvesistä johtuen suuria. Velvoitetarkkailutulosten ja muutamien oletusten avulla laskettiin fosforikuormitus- ja pitoisuusarvot esiselkeytetylle ja lähtevälle jätevedelle sekä ohitusvirtaamille ja vesistöön johdettavalle kokonaisvirtaamalle. Samoille virtaamille laskettiin myös fosforikuormitus- ja -pitoisuusarvot käyttäen hyväksi laitosmittakaavan esisaostuksen fosforituloksia. Laskentojen perusteella esisaostus riittäisi täyttämään oletettavasti tiukentuvan lupaehdon fosforipitoisuusvaatimuksen $0,3 \text{ mg/l}$ vesistöön lähtevässä jätevedessä.

Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon aktiivilieteprosessia simuloitiin Activated Sludge Model 4.0 –ohjelmalla. Tavoitteena oli selvittää kuormitusvaihteluiden merkitys ja optimoida ajoparametrien säätöä. Ensin ohjelmalla simuloitiin talvisen mitoitusvirtaamavuorokauden tiedot eri ilmastusaltaan hapellisten lohkojen määrällä. Lohkojen ilmastaminen hapellisiksi on Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla merkittävin yksittäinen sähkönkuluttaja, minkä takia tutkittiin simuloinnin avulla, onko tarpeellista ilmastaa lohkoja 4 ja 5, jotka voidaan säätää myös anoksisiksi.

Paremmat ammoniumtyypitulokset lähtevälle jätevedelle saatiin ilmastamalla lohkot 4 ja 5. Nitrifikaatiobakteerit kasvavat talvisin hitaammin kylmässä vedessä, minkä takia nitrifikaatiolle tarvitaan suurempi tilavuus talvisin.

Huippuvirtaamakaussina jätevesi on kylmää, jolloin hapellisten lohkojen tarve on suuri eli lohkot 4 ja 5 pidetään ilmastettuina. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamolla on huippuvirtaamakaussina käytetty ”biologinen ravinteidenpoisto” –ajotapaa. Tätä vertailtiin simulointiohjelman avulla ”tehostettu kemialliseen käsittely” –ajotapaan. Ajotavat eroavat ilmastusaltaalle johdettavan esiselkeytetyn jäteveden määrässä. ”Biologinen ravinteidenpoisto” –ajotavalla ilmastusaltaalle syötetään yhtä paljon tulevaa jätevettä kuin esiselkeytettyä, mutta ”tehostetulla kemiallisella käsittelyllä” ilmastusaltaalle johdetaan vain tulevaa jätevettä.

Puhdistustulokset näiden kahden eri ajotavan välillä eivät eronneet merkittävästi, mistä pääteltiin, että aktiivilieteprosessin rajoittava tekijä ei ole ilmastusaltaalle johdettavan hiililähteen määrä. Ilmastusaltaan suuri kapasiteetti riittää kompensoimaan huippuvirtaamakaussien aikana ravinnepitoisuuksien laskun, eikä typenpoisto kärsi laimeammista virtaamista. Hermanninsaaren puhdistamon aktiivilieteprosessin rajoittava tekijä huippuvirtaamakaussina on jälkiselkeytysaltaan pinta-ala, sillä viipymääjan laskiessa altaan pintakuorma nousee, jolloin liete ei ehdi laskeutua, vaan ravinteita ja kiintoainetta huuhtoutuu vesistöön.

Esisaostuksen ja aktiivilieteprosessin eri ajotapojen vaikutukset huippuvirtaamakautena Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon puhdistustuloksiin saadaan selville, kun niitä pystytään tutkimaan huippuvirtaamakaussien aikana.

10. Lähteet

E. Aittomäki, T. Eerikäinen, M. Leisola, H. Ojamo, I. Suominen, N von Weyman, Bioprosessitekniikka, ISBN 951-0-26995-6, 2002.

Baden, Basel, Bern, Liestal, Lausanne, Luzern, Olten, Schwyz, Winterthur, Tutorial: Dynamic simulation software for biological wastewater treatment modeling; Activated sludge simulation program, ISO 9001-2000, 2006.

L. de-Bashan, Y. Bashan, Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer, Water Research 38 (2004), s. 4222-2346, 2004.

J. Berg, J. Tymoczko, L. Stryer, Biochemistry, W. H. Freeman and Company, ISBN-13: 978-0-7167-8724-5. 2006.

T. Clark, T. Stephenson, P. Pearce, Phosphorus removal by chemical precipitation in a biological aerated filter, School of Water Sciences, Cranfield university, U.K, 1996.

N. Cheremisinoff, Biotechnology for waste and wastewater, ISBN 1591240220, s. 151-, 1996.

N. Cheremisinof, Handbook of water and wastewater technologies, ISBN 978-0-7506-7498-0, 2002.

J. Duenas, J. Alonso, A. Rey, A. Ferrer, Characterisation of phosphorous forms in wastewater treatment plants, Journal of Hazardous Materials B97 (2003), s. 193-205, 2002.

E. Galarneau, R. Gehr, Phosphorus removal from wastewaters: experimental and theoretical support for alternative mechanisms, Water Research vol 31 (1997), McGill University, 1996.

L. Gillberg, B. Hansen, I. Karlsson, A. Nordström, A. Pålsson, About water treatment, Kemira Kemwater, ISBN 91-631-4344-5, 2003.

I. Hakala, J. Myllymäki, R. Saarinen, Rihmaopas, Käsikirja rihmamaisten bakteerien tunnistamiseksi ja niiden aiheuttamien ongelmien torjumiseksi, 1998.

J. Heino, M. Vuento, Biokemian ja solubiologian perusteet, ISBN 978-951-0-35591-6, 2010.

M. Henze, P. Harremoes, J. Jansen, E. Arvin, Wastewater Treatment Biological and Chemical Processes, kolmas painos, ISBN 3-540-42228-5, 2000.

M Henze, W. Gujer, T. Mino, M. van Loosfrecht, Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, ISBN 1 900222 248, 2002.

I. Ismail, A. Fawzy, N. Abdel-Monem, M. Mahmoud, M. El-Halwany, Combined coagulation flocculation pretreatment unit for municipal wastewater, Journal of Advanced Research vol 3 (2012), Mansoura University, Egypti, 2011.

S. Isoaho, M. Valve, Vesikemianperusteet, toinen painos, ISBN 9516713920, Helsinki, 1988.

Y. Jin, use of a high resolution photographic technique for studying coagulation/flocculation in water treatment, Department of Civil and Geological Engineering, University of Saskatchewan, 2005.

A. Kuokkanen, A. Niemelä, Hermanninsaaren jvp:n kuormitustarkkailu, Vuosiyhteenveto 2013, 2014.

A. Kuokkanen, A. Niemelä, Hermanninsaaren jvp:n kuormitustarkkailu, Vuosiyhteenveto 2012, 2013.

A. Kuokkanen, A. Niemelä, J. Lindholm, Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon fosforinpoiston tehostaminen, Raportti 1186-P18936, 2012.

J. Laitinen, J. Nieminen, R. Saarinen, S. Toivikko, Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT) - Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamon, Suomen ympäristö 3/2014, ISBN 978-952-11-4286-4, 2014.

D. Lee, Y. Hsu, Fast Freeze/Thaw Treatment on Excess Activated Sludges: Floc Structure and Sludge Dewaterability, National Taiwan University, 1994.

A. Niemelä, Porvoon vesilaitos; Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamo prosessisuunnitelma, 1999.

A. Omoike, G. Vanloon, Removal of phosphorus and organic matter removal by alum during wastewater treatment, Department of Chemistry, Queen's University, Kingston, Canada, 1998.

R. Oravainen, J. Koski-Vähälä, Suomen Vesiensuojeluyhdistysten Liiton kannanotto Euroopan yhteisöjen tuomioistuimen asiaan C-334/07 (yhdyskuntajätevedet), 2007.

U. Pagga, J. Bachner, U. Strotmann, Inhibition of nitrification in laboratory tests and model wastewater treatment plants, Chemosphere vol 65 (2996), 2006.

M. Perttilä, Itämeriportaali: Typen kierto, Ilmatieteenlaitos, 2003.

H. Poutanen, Alkukemikaloinnin tehostaminen talousveden valmistuksessa, Diplomityö, Insinööritieteiden korkeakoulu, Aalto yliopisto, 2012.

Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL, RIL 124-1 Vesihuolto 1, Helsinki, ISBN 951-758-431-8, 2003.

Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL, RIL 124-2 Vesihuolto 1, Helsinki, ISBBN 951-758-438-5, 2004.

K. Stendahl, Vedenkäsittelyn käsikirja, Kemira, 1980.

R. Stuez, Principles of Water and Wastewater Treatment Processes, ISBN 1843390264, 2009.

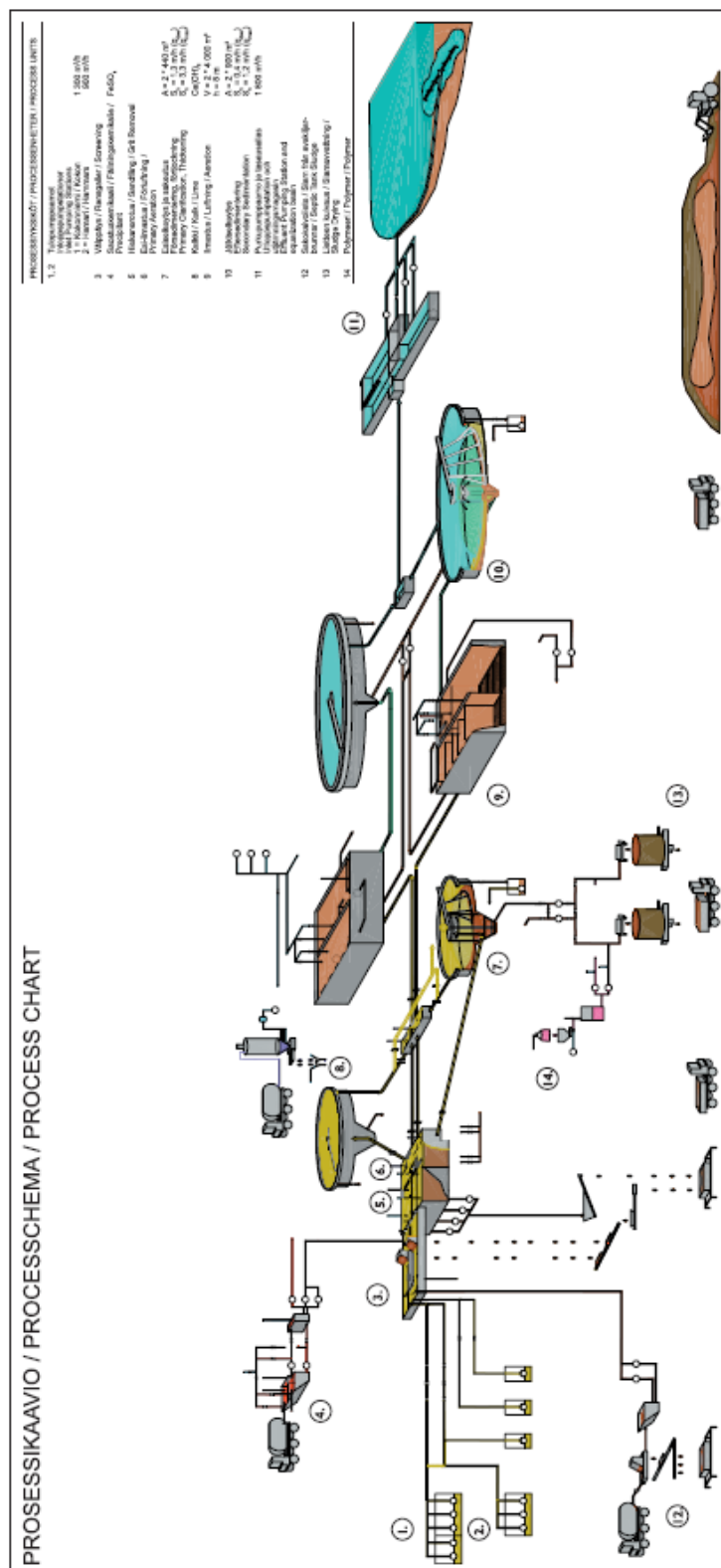
A. Sykes, Kinetics of inorganic reactions, University of Leeds, Pergamon Press, London, ISDM 978-0080114415, 1966.

J. Thistleton, T. Berry, P. Pearce, S. Parsons, Mechanisms of chemical phosphorus removal II Iron Salts (III), Institution of Chemical Engineers vol 80 (2002), 2002.

Vaasan Hallintaoikeus, Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon ympäristölupahakemus, lupa- ja korvauspäätös, 15.12.2006.

B. Ward, D. Arp, M. Klotz, Nitrification, ISBN 9781613442678, s. 405-418, 2011.

Z. Yuan, S. Pratt, D. Batstone, Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes, Current Opinion in Biotechnology vol 23 (2012), 2012.



Kuva 1. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon prosessikaavio.

LIITE 2

Taulukko 1. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon puhdistustulokset vuonna 2013.
(Kuokkanen, 2014)

| Parametri | Laatu | I/ 2013 | II/ 2013 | III/ 2013 | IV/ 2013 | lupaehdot |
|-----------------------------|-------|------------|-------------|--------------|-------------|-----------|
| BOD₇(atu) | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 3,4 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | |
| | % | 99 | 99 | 99 | 99 | |
| - vesistöön | mg/l | 4,3 | 7,8 | 3,4 | 3,7 | ≤ 10 |
| | % | 98 | 97 | 99 | 99 | ≥ 95 |
| COD_{Cr} | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 31 | 30 | 27 | 29 | |
| | % | 96 | 95 | 96 | 95 | |
| - vesistöön | mg/l | 33 | 42 | 28 | 31 | ≤ 60 |
| | % | 95 | 93 | 95 | 95 | ≥ 90 |
| Kok. fosfori | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 0,28 | 0,16 | 0,13 | 0,14 | |
| | % | 97 | 98 | 99 | 98 | |
| - vesistöön | mg/l | 0,31 | 0,33 | 0,15 | 0,17 | ≤ 0,5 |
| | % | 97 | 96 | 98 | 98 | ≥ 93 |
| Kok. typpi | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 12 | 8,1 | 12 | 15 | |
| | % | 83 | 84 | 80 | 70 | |
| | % | 79 | | | | |
| - vesistöön | mg/l | 12 | 8,9 | 12 | 15 | |
| | % | 82 | 81 | 79 | 70 | |
| | % | 78 | | | | ≥ 70 |
| Ammoniumtyppi | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 0,20 | 1,1 | 1,5 | 5,2 | |
| | % | 99,7 | 98 | 98 | 89 | |
| - vesistöön | mg/l | 0,37 | 2,0 | 1,7 | 5,5 | |
| Kiintoaine | | | | | | |
| - käsitelty | mg/l | 6,7 | 3,9 | 4,2 | 3,5 | |
| | % | 99 | 99 | 99 | 99 | |
| - vesistöön | mg/l | 8,2 | 14 | 5,1 | 4,9 | 35 |
| | % | 98 | 97 | 99 | 99 | 90 |



Water is the connection

Tuote-esite
(Rel: 04/2013)

KEMIRA PAX-XL100

Polyalumiinikloridiliuos

KEMIRA PAX-XL100 on keskiemäksinen polyalumiinikloridiliuos, jota käytetään saostus-aineena juoma- ja jätevedenpuhdistuksessa sekä teollisissa sovelluksissa. KEMIRA PAX-XL100 toiminta perustuu korkeasti varautuneeseen alumiiniin, jonka ansiosta tuote toimii tehokkaammin perinteisiin saostusaineisiin verrattuna.

TUOTESPESIFIKAATIO

| Ulkomuoto | Kellertävä neste |
|------------------------|-------------------------------|
| Alumiini (Al^{3+}) | 9,3 ± 0,3 % |
| Al_2O_3 | 17,6 ± 0,6 % |
| Emäksisyys | 43 ± 2 % |
| Tiheys | 1,39 ± 0,03 g/cm ³ |

MUUT OMINAISUUDET

| | |
|-----------------------|---------------|
| Aktiiviainepitoisuus | n. 3,4 mol/kg |
| Rauta (Fe_{tot}) | < 0,01 % |
| Kloridi (Cl^-) | 21 ± 1 % |
| Viskositeetti (20 °C) | 40 ± 10 mPas |
| pH (20 °C) | < 1 |
| Jäätymispiste | -20 °C |

Laatu

KEMIRA PAX-XL100 täyttää juomavesien käsittelyssä käytettävälle kemikaaleille asetetun standardin EN 883 vaatimukset (European Standard EN 883:2004 Chemicals used for treatment of water intended for human consumption, Polyaluminium chloride hydroxyde and polyaluminium chloride hydroxyde sulfate). KEMIRA PAX-XL100 täyttää myös AWWA standardin vaatimukset polyalumiinikloridille.

Annostelu

KEMIRA PAX-XL100 voidaan annostella kalvopumpulla suoraan varastosäiliöstä.

Soveltuvat materiaalit ja varastointi

KEMIRA PAX-XL100 on lievästi syövyttävä ja aiheuttaa hitaasti korroosiota useimmille metalleille. KEMIRA PAX-XL100 kanssa kosketuksiin joutuvien osien tulee olla muovia (PE, PP, PVC), lasikuituvahvisteista polyesteriä, titaania tai kumioitua terästä. Tämä on huomioitava valittaessa pumppuja, putkistoja ja varastosäiliöitä.

KEMIRA PAX-XL100 suositeltava säilytysaika on max. 8 kuukautta. Kemikaalin varastosäiliö suositellaan puhdistettavan vuosittain.

Jos tuote varastoidaan ulkona, säiliön ja putkiston tulee olla eristetty ja lämpösaattettu. Tuotteen suositeltu varastointilämpötila on 0-30 °C.

Toimitukset

KEMIRA PAX-XL100 voidaan toimittaa irtotavarana säiliöautolla, 1 m³:n IBC-konteissa ja 30 l kanistereissa.

Käyttöturvallisuus

Kemikaalia tulee käsitellä varoen. Henkilöiden, jotka vastaavat KEMIRA PAX-XL100 käytöstä ja käsittelystä, tulee tutustua käyttöturvallisuustiedotteeseen ennen tuotteen käsittelyä.

Kemira antaa edellä mainitut tiedot vain asiakkaan tiedottamateriaalissaan, ja tiedon tarkoituksena on auttaa asiakasta tuotteen asennuksessa. Asiakkaan on testattava meidän tuotteemme sen varmistamiseksi, että ne sopivat asiakkaan haluamiin käyttöolosuhteisiin ja soveltuksien myöskin hyönteisvaurioiden ja -tuhojen torjuntaan. Asiakkaan on myös annettava työntekijöilleen, agentteilleen, alihankkijoiden, asiakkaiden ja muille tuotteelle altistaville kolmansille osapuolille koulutusta sovellettavista varoista. Kaikki tiedot ja tekstit tulisi antaa ilman mitään vastuuta, ja tietoja voidaan muuttaa ilman ennakkoilmoitusta. Asiakas vastaa täysin kaikkien tietojen ja varoitusten sekä kaikkien hakintavaroitusten luotettavuudesta, prosessoinnista, kuluista, toiminnasta, purkamisesta, hävittämisestä, varastoinnista, käsittelystä, myynnistä ja käytöstä antamien (oikein) asetusten, säätöjen ja määräysten noudattamisesta. Mitään tässä asiakirjassa ei voida tulkita suostukseksi käyttää jatkossa tuotteita mitään materiaalia tai sen käyttöä suostuneen jälkeen vastustamatta.

Kuva 1. PAX-XL100-saostuskemikaalin tuote-esite.

kemira

Water is the connection

KEMIRA PAX-XL60

Polyalumiinikloridiliuos

KEMIRA PAX-XL60 on keskiemäksinen polyalumiinikloridiliuos, jota käytetään saostus-aineena juoma- ja jätevedenpuhdistuksessa sekä teollisissa sovelluksissa. KEMIRA PAX-XL60 toiminta perustuu korkeasti varautuneeseen alumiiniin, jonka ansiosta tuote toimii tehokkaammin perinteisiin saostusaineisiin verrattuna.

TUOTESPESIFIKAATIO

| Ulkomuoto | Kellertävä neste |
|------------------------|---------------------------------|
| Alumiini (Al^{3+}) | $7,5 \pm 0,5 \%$ |
| Al_2O_3 | $14,2 \pm 1,0 \%$ |
| Emäksisyys | $40 \pm 5 \%$ |
| Tiheys | $1,30 \pm 0,02 \text{ kg/dm}^3$ |

MUUT OMINAISUUDET

| | |
|-----------------------|--------------------------|
| Aktiiviniipitoisuus | n. 2,8 mol/kg |
| Rauta (Fe_{tot}) | $< 0,01 \%$ |
| Kloridi (Cl^-) | $16 \pm 2 \%$ |
| Viskositeetti (20 °C) | $20 \pm 10 \text{ mPas}$ |
| pH (20 °C) | $1,5 \pm 0,5$ |
| Jäätymispiste | -30 °C |

Laatu

KEMIRA PAX-XL60 täyttää juomavesien käsittelyssä käytettävälle kemikaaleille asetetun standardin EN 883 vaatimukset (European Standard EN 883:2004 Chemicals used for treatment of water intended for human consumption, Polyaluminium chloride hydroxyde and polyaluminium chloride hydroxyde sulfate). KEMIRA PAX-XL60 täyttää myös AWWA standardin vaatimukset polyalumiinikloridille.

Tuote-esite

(Ref: 04/2013)

Annostelu

KEMIRA PAX-XL60 voidaan annostella kalvopumpulla suoraan varastosäiliöstä.

Soveltuvat materiaalit ja varastointi

KEMIRA PAX-XL60 on lievästi syövyttävä ja aiheuttaa hitaasti korroosiota useimmille metalleille. KEMIRA PAX-XL60 kanssa kosketuksiin joutuvien osien tulee olla muovia (PE, PP, PVC), lasikuituvahvisteista polyesteriä, titaania tai kumioitua terästä. Tämä on huomioitava valittaessa pumppuja, putkistoja ja varastosäiliöitä.

KEMIRA PAX-XL60 suositeltava säilytysaika on max. 12 kuukautta. Kemikaalin varastosäiliö suositellaan puhdistettavan vuosittain.

Jos tuote varastoidaan ulkona, säiliön ja putkiston tulee olla eristetty ja lämpösaattettu. Tuotteen suositeltu varastointilämpötila on 0-30 °C.

Toimitukset


KEMIRA PAX-XL60 voidaan toimittaa irtotavarana säiliöautolla, 1 m³:n IBC-konteissa ja 30 l kanistereissa.

Käyttöturvallisuus

Kemikaalia tulee käsitellä varoen. Henkilöiden, jotka vastaavat KEMIRA PAX-XL60 käytöstä ja käsittelystä, tulee tutustua käyttöturvallisuustiedotteeseen ennen tuotteen käsittelyä.

Kemira antaa edellä mainitut tiedot vain asiakkaan tiedottamistarkoituksessa, ja tiedon tarkoituksena on avoimesti antaa asiakasta tuotteen anvoinnissa. Asiakkaan on tehtävä meidän tuotteen sen valmistamiseksi, että ne sopivat asiakkaan haluttuun käyttökäyttöön ja soveltuksin myös työolosuhteiden ja -turvallisuuden sekä ympäristön näkökulmasta. Asiakkaan on myös annettava työntekijöilleen, agentteilleen, alihankkijoilleen, asiantuntijoilleen ja muille luottaville alustavalle koulutuksella koulutusta sovellettuja varotoimia. Kaikki tiedot ja tekninen tuki annetaan ilman mitään vastuuta laatuun, ja tietoja voidaan muuttaa ilman ennakkoilmoitusta. Asiakas vastaa näytin kaikkien tietojen ja varotoimien sekä kaikkien hallintamateriaalien tuotteen prosessoinnista, kuljetuksesta, toimittamisesta, purkamisesta, hävittämisestä, varastoinnista, käsittelystä, myynnistä ja käytöstä arvioimalla laatuun, asetuksiin, säätöihin ja määräysten noudattamisesta. Eteenpäin tässä asiakirjassa ei voida tulla suositukseksi käyttää jouta tuotetta muiden materiaaleja tai sen käyttöä suojaavan jätteen varastointiin.

Kuva 1. PAX-XL60-saostuskemikaalin tuote-esite.



Water is the connection

Tuote-esite
(Ref:08/2012)

KEMIRA PIX-105

Ferrisulfaattiliuos

KEMIRA PIX-105 on vedenpuhdistuksessa käytettävä nestemäinen saostusaine, jonka teho perustuu aktiiviseen kolmiarvoiseen rautaan (Fe^{3+}).

KEMIRA PIX-105 sopii jätevesien puhdistukseen, lietteenkäsittelyyn sekä myös rikkivedyn torjuntaan.

TUOTESPESIFIKAATIO

| | |
|----------------------------|--------------------|
| Ulkomuoto | tummanruskea neste |
| Rauta (Fe^{3+}) | $11,2 \pm 0,5 \%$ |
| Rauta (Fe^{2+}) | $< 0,5 \%$ |
| Liukenematon | $< 0,2 \%$ |

MUUT OMINAISUUDET

| | |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Sulfaatti (SO_4^{2-}) | $32 \pm 2 \%$ |
| pH | $< 1,0$ |
| Tiheys | $1500 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ |
| Viskositeetti (23°C) | $25 \pm 5 \text{ cP}$ |

Annostelu

KEMIRA PIX-105 voidaan annostella kalvo-pumpeilla laimentamattomana suoraan varastosäiliöstä tai vedellä laimennettuna.

Soveltuvat materiaalit ja varastointi

KEMIRA PIX-105 kanssa kosketuksiin joutuvien osien tulee olla muovia (PE, PP, PVC), lasikuitu- vahvisteista polyesteriä, titaania, kumioitua tai haponkestävää terästä. Tämä on huomioitava valittaessa pumppuja, putkistoja ja varastosäiliötä.

KEMIRA PIX-105 suositeltava varastointiaika on korkeintaan 6 kk. Tuotteen suositeltava käyttö- ja varastointilämpötila on $0 - 30^\circ\text{C}$. Säilytysastia tulee merkitä tuotteen teknisellä nimellä sekä varoitusmerkillä.

Toimitukset

KEMIRA PIX-105 toimitetaan irtotavarana säiliöautolla. Tuotetta on saatavana myös 1 m^3 IBC konteissa sekä 30 l kanistereissa.

Käyttöturvallisuus

Kemikaalia tulee käsitellä varoen. Henkilöiden, jotka vastaavat KEMIRA PIX-105 käytöstä ja käsittelystä, tulee tutustua käyttöturvallisuustiedotteeseen ennen tuotteen käsittelyä.

Asiakaspalvelu

Kemikaalilaukset: kwtilaukset@kemira.com
Puh. 010 862 8929

Kemira antaa edellä mainitut tiedot vain asiakkaan tiedottamistarkoituksessa, ja tiedot tarkoituksena on ilmoittaa auttaa asiakasta tuotteen arvioinnissa. Asiakkaan on tiedettävä meidän tuotteemme sen valmistamiseksi, että ne sopivat asiakkaan haluttuun käyttöolosuhteeseen ja soveltuksien myös työturvallisuuden ja -turvallisuuden sekä ympäristön näkökulmista. Asiakkaan on myös annettava jätteenkäsittely, agentteille, alihankkijalleen, maahanrakentajalle ja muille tuotteen alustaville kalmentalle osapuolille koulutusta sovellettavista varotoimista. Kaikki tiedot ja tekniset tiedot annetaan ilman mitään vastuuta, ja tietoja voidaan muuttaa ilman ennakkoilmoitusta. Asiakas vastaa täysin kaikkien tietojen ja varotoimien sekä kaikkien hakintovälineiden tuotteen prosessoinnista. Käyttöturvallisuus, käyttöolosuhteet, pumppaus, laimennus, varastointi, käsittely, myyminen ja käyttöä antamien lukien, asiakas vastaa, säilyttämisen ja määrityksen noudattamisesta. Mitään tässä asiakas ei voi voida tulla suositukseksi käyttää jotain tuotetta mitään materiaalia tai sen käyttöä suojaavien patenit vastustaa.

Kuva 1. PIX-105-saostuskemikaalin tuote-esite.

kemira

Water is the connection

Tuote-esite

(Ref: 09/2012)

ALF-30**Rakeinen alumiini- ja ferrisulfaatin seos**

ALF-30 on vedenpuhdistuksessa käytettävä rakeinen veteen liukeneva saostusaine, jonka teho perustuu aktiivisiin kolmiarvoisiin alumiini- ja rautayhdisteisiin.

ALF-30 sopii jätevesien puhdistukseen ja sitä voidaan käyttää useimmissa puhdistusprosesseissa.

TUOTESPESIFIKAATIO

| Ulkomuoto | rakeinen, harmahtava, kellanruskea |
|---|------------------------------------|
| Alumiini (Al^{3+}) | > 6,7 % |
| Aktiivinen aine ($\text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{3+}$) | $10,7 \pm 1,3$ % |
| Rauta (Fe^{2+}) | < 0,2 % |
| Vapaa H_2SO_4 | < 0,7 % |
| Veteen liukenematon | < 0,4 % |

MUUT OMINAISUUDET

| | |
|----------------------------------|------------------------------|
| Seula-analyysi 0,5-2,5 mm | > 90 % |
| Irtotiheys | $900 \pm 100 \text{ kg/m}^3$ |
| Valumakulma | 38° |
| Sulfaatti (SO_4^{2-}) | < 49 % |

Annostelu ja liuotus

ALF-30 liuotetaan tavallisesti veteen ennen annostelua. Jatkovaa liuotusta voidaan käyttää erityisen AVR-liuotuslaitteen avulla. ALF-30 liuoksia voi valmistaa myös panoksina. Liuoksen väkevyydeksi suositellaan 5–20 m-% raetta (jatkuva liuotus) tai 5–40 m-% raetta (panosliuotus).

Liuosmuotoinen ALF-30 voidaan annostella kalvopumpulla suoraan käyttökohteeseen.

Soveltuvat materiaalit

Varastoinnissa ja annostelussa käytettävien materiaalien tulee olla muovia (PE, PP, PVC), lasikuitumuovia, epoksilla pinnoitettua betonia tai haponkestävää/kumioitua terästä.

Toimitukset

ALF-30 voidaan toimittaa irtotavarana säiliöautolla sekä 35 kg:n ja 1000 kg:n säkeissä.

Käyttöturvallisuus

Kemikaalia tulee käsitellä varoen. Henkilöiden, jotka vastaavat ALF-30:n käytöstä ja käsittelystä, tulee tutustua käyttöturvallisuustiedotteeseen ennen tuotteen käsittelyä.

Asiakaspalvelu

Kemikaaliliitaukset: kwtilaukset@kemira.com
Puhelin: 010 862 8929

Kemira antaa edellä mainitut tiedot vain asiakkaan tiedottamistarkoituksessa, ja tiedot tarkoituksena on ilmoittaa asiakasta tuotteen ominaisuuksista. Asiakkaan on testattava meidän tuotteemme sen varmistamiseksi, että ne sopivat asiakkaan haluttuun käyttökohteeseen ja soveltuisiin myös työolosuhteiden ja -lunailuuden sekä ympäristön näkökulmasta. Asiakkaan on myös annettava työolosuhteiden, aineiden, alihankkijoiden, asiakkaalleen ja muille tuotteille alttuville kohteille osapuolelta koulutusta sovellettavista varotoimista. Kaikki tiedot ja tekninen tuki annetaan ilman merkinnöistä talletusta, ja tietoja voidaan muuttaa ilman ennakkoihmoistusta. Asiakas vastaa täysin kaikkien tietojen ja varotoimien osalta kaikkien hallinto- ja varotoimien prosessoinnista. Käytöstä, toimuksesta, purkamisesta, hävittämisestä, varastoinnista, käsittelystä, myynnistä ja käytöstä aiheutuvien osien, asennusten, osakosten ja määrärajojen noudattamisesta. Mikään näistä asiakkeista ei voida tulla suositukseksi käyttää jokin tuotetta miltään materiaalia tai sen käyttöä suojavien patentojen vastaisesti.

Kuva 1. ALF-30-saostuskemikaalin tuote-esite.

LIITE 7

Taulukko 1. Saostuskemikaali-PAX:n syöttötiedot keväällä 2014.

| | Tuleva jätevesi yhteensä m³/d | PAX m³/d | kg/d | Huomioita |
|-----------|--|-------------|--------|----------------------------|
| 26.3.2014 | 13059 | 0.35 | 489.7 | annostelu hiekanerotukseen |
| 27.3.2014 | 12650 | | | |
| 28.3.2014 | 12337 | | | |
| 29.3.2014 | 11901 | | | |
| 30.3.2014 | 11742 | | | |
| 31.3.2014 | 11931 | 0.57 | 795.4 | |
| 1.4.2014 | 11582 | 0.35 | 482.6 | |
| 2.4.2014 | 11504 | | | |
| 3.4.2014 | 11292 | | | |
| 4.4.2014 | 11143 | 0.32 | 445.7 | |
| 5.4.2014 | 10671 | | | |
| 6.4.2014 | 10686 | | | |
| 7.4.2014 | 11059 | | | |
| 8.4.2014 | 10997 | 0.35 | 481.1 | |
| 9.4.2014 | 10907 | | | |
| 10.4.2014 | 10832 | 0.52 | 722.1 | |
| 11.4.2014 | 11037 | | | |
| 12.4.2014 | 11033 | | | |
| 13.4.2014 | 11097 | | | |
| 14.4.2014 | 11264 | | | |
| 15.4.2014 | 11113 | | | |
| 16.4.2014 | 11026 | 0.79 | 1102.6 | |
| 17.4.2014 | 10795 | 0.78 | 1079.5 | |
| 18.4.2014 | 9936 | 0.71 | 993.6 | |
| 19.4.2014 | 9625 | 0.69 | 962.5 | |
| 20.4.2014 | 9616 | 0.69 | 961.6 | |
| 21.4.2014 | 10153 | 0.73 | 1015.3 | |
| 22.4.2014 | 10627 | 0.76 | 1062.7 | |
| 23.4.2014 | 10492 | 0.75 | 1049.2 | |
| 24.4.2014 | 10536 | 0.76 | 1053.6 | |
| 25.4.2014 | 10303 | 0.74 | 1030.3 | |
| 26.4.2014 | 9752 | | | |
| 27.4.2014 | 9788 | | | |
| 28.4.2014 | 10052 | | | |
| 29.4.2014 | 10010 | | | |
| 30.4.2014 | 9787 | 1.06 | 1468.1 | |
| 1.5.2014 | 9367 | 1.01 | 1405.1 | |
| 2.5.2014 | 9635 | 1.04 | 1445.3 | |
| 3.5.2014 | 9397 | 1.01 | 1409.6 | |
| 4.5.2014 | 9903 | 1.07 | 1485.5 | |
| 5.5.2014 | 9965 | 1.08 | 1494.8 | |
| 6.5.2014 | 9910 | 1.07 | 1486.5 | |
| 7.5.2014 | 9923 | 1.07 | 1488.5 | |
| 8.5.2014 | 10033 | 1.08 | 1505.0 | |
| 9.5.2014 | 12369 | 1.33 | 1855.4 | |

LIITE 7

| | | | | |
|-----------|-------|------|--------|---|
| 10.5.2014 | 11446 | 1.24 | 1716.9 | |
| 11.5.2014 | 13071 | 1.41 | 1960.7 | |
| 12.5.2014 | 12181 | 1.31 | 1827.2 | |
| 13.5.2014 | 14490 | 1.56 | 2173.5 | |
| 14.5.2014 | 15713 | 1.70 | 2357.0 | syöttöpitoisuus vaihdettu 150 mg/l:sta 100 mg/l:aan |
| 15.5.2014 | 13637 | 0.98 | 1363.7 | |
| 16.5.2014 | 12742 | 0.92 | 1274.2 | |
| 17.5.2014 | 11480 | 0.83 | 1148.0 | |
| 18.5.2014 | 11196 | 0.81 | 1119.6 | |
| 19.5.2014 | 11918 | 0.86 | 1191.8 | |
| 20.5.2014 | 11637 | 0.84 | 1163.7 | |
| 21.5.2014 | 11351 | 0.82 | 1135.1 | |
| 22.5.2014 | 11045 | 0.79 | 1104.5 | |
| 23.5.2014 | 10688 | 0.77 | 1068.8 | |
| 24.5.2014 | 10010 | 0.72 | 1001.0 | |
| 25.5.2014 | 9914 | 0.71 | 991.4 | |
| 26.5.2014 | 10212 | 0.73 | 1021.2 | |
| 27.5.2014 | 10518 | 0.76 | 1051.8 | annostelu esiselkeytykseen meneviin kaivoihin |
| 28.5.2014 | 12112 | 0.87 | 1211.2 | |
| 29.5.2014 | 12525 | 0.90 | 1252.5 | |
| 30.5.2014 | 11341 | 0.82 | 1134.1 | |
| 31.5.2014 | 10501 | 0.76 | 1050.1 | |
| 1.6.2014 | 10046 | 0.72 | 1004.6 | |
| 2.6.2014 | 10255 | 0.74 | 1025.5 | |
| 3.6.2014 | 10018 | 0.72 | 1001.8 | |
| 4.6.2014 | 10245 | 0.74 | 1024.5 | |
| 5.6.2014 | 10095 | 0.73 | 1009.5 | |
| 6.6.2014 | 9795 | 0.70 | 979.5 | |
| 7.6.2014 | 8899 | 0.64 | 889.9 | |
| 8.6.2014 | 8823 | 0.63 | 882.3 | |
| 9.6.2014 | 10006 | 0.72 | 1000.6 | |
| 10.6.2014 | 13373 | 0.96 | 1337.3 | |
| 11.6.2014 | 11663 | 0.84 | 1166.3 | |
| 12.6.2014 | 11663 | 0.84 | 1166.3 | |
| 13.6.2014 | 12624 | 0.91 | 1262.4 | |
| 14.6.2014 | 10718 | 0.77 | 1071.8 | |
| 15.6.2014 | 10164 | 0.73 | 1016.4 | |
| 16.6.2014 | 11118 | 0.80 | 1111.8 | |
| 17.6.2014 | 10782 | 0.78 | 1078.2 | |
| 18.6.2014 | 10296 | 0.74 | 1029.6 | |
| 19.6.2014 | 10142 | 0.73 | 1014.2 | |
| 20.6.2014 | 8892 | 0.64 | 889.2 | |
| 21.6.2014 | 8108 | 0.58 | 810.8 | |
| 22.6.2014 | 9453 | 0.68 | 945.3 | |
| 23.6.2014 | 13089 | 0.94 | 1308.9 | |
| 24.6.2014 | 12354 | 0.89 | 1235.4 | |
| 25.6.2014 | 10792 | 0.78 | 1079.2 | |
| 26.6.2014 | 11213 | 0.81 | 1121.3 | |
| 27.6.2014 | 3066 | 0.22 | 306.6 | |

LIITE 8

Taulukko 1. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon virtaama- ja lietemäärät keväällä 2012.

| | Tuleva jätevesi | Ohitus | Lähtevä vesi | Vesistöön | Syntyvä liete | Syntyvä liete |
|-----------|--------------------|----------|-----------------|-----------|------------------|------------------|
| | yhteensä | yhteensä | yhteensä | | | |
| | m³/d | m³/d | m³/d | m³/d | kg/d | m³/d |
| 1.3.2012 | 9282 | 0 | 9264.4 | 9264.4 | 20750 | 17.6 |
| 2.3.2012 | 10729 | 0 | 10711.4 | 10711.4 | 20750 | 17.6 |
| 3.3.2012 | 10099 | 0 | 10090.4 | 10090.4 | 10140 | 8.6 |
| 4.3.2012 | 9716 | 0 | 9707.4 | 9707.4 | 10140 | 8.6 |
| 5.3.2012 | 10026 | 0 | 10017.4 | 10017.4 | 10140 | 8.6 |
| 6.3.2012 | 9776 | 0 | 9767.4 | 9767.4 | 10140 | 8.6 |
| 7.3.2012 | 9720 | 0 | 9708.1 | 9708.1 | 14087 | 11.9 |
| 8.3.2012 | 9592 | 0 | 9580.1 | 9580.1 | 14087 | 11.9 |
| 9.3.2012 | 9511 | 0 | 9499.1 | 9499.1 | 14087 | 11.9 |
| 10.3.2012 | 9741 | 0 | 9732.1 | 9732.1 | 10460 | 8.9 |
| 11.3.2012 | 10485 | 0 | 10476.1 | 10476.1 | 10460 | 8.9 |
| 12.3.2012 | 11930 | 256 | 11665.1 | 11921.1 | 10460 | 8.9 |
| 13.3.2012 | 11908 | 0 | 11899.1 | 11899.1 | 10460 | 8.9 |
| 14.3.2012 | 11455 | 39 | 11404.1 | 11443.1 | 14100 | 11.9 |
| 15.3.2012 | 11308 | 0 | 11296.1 | 11296.1 | 14100 | 11.9 |
| 16.3.2012 | 11645 | 0 | 11633.1 | 11633.1 | 14100 | 11.9 |
| 17.3.2012 | 12133 | 0 | 12124.4 | 12124.4 | 10155 | 8.6 |
| 18.3.2012 | 13286 | 0 | 13277.4 | 13277.4 | 10155 | 8.6 |
| 19.3.2012 | 14549 | 0 | 14540.4 | 14540.4 | 10155 | 8.6 |
| 20.3.2012 | 15994 | 0 | 15985.4 | 15985.4 | 10155 | 8.6 |
| 21.3.2012 | 16052 | 32 | 16008.5 | 16040.5 | 13607 | 11.5 |
| 22.3.2012 | 17645 | 0 | 17633.5 | 17633.5 | 13607 | 11.5 |
| 23.3.2012 | 23725 | 990 | 22723.5 | 23713.5 | 13607 | 11.5 |
| 24.3.2012 | 24061 | 460 | 23592.4 | 24052.4 | 10185 | 8.6 |
| 25.3.2012 | 23679 | 314 | 23356.4 | 23670.4 | 10185 | 8.6 |
| 26.3.2012 | 21488 | 73 | 21406.4 | 21479.4 | 10185 | 8.6 |
| 27.3.2012 | 29770 | 5629 | 24132.4 | 29761.4 | 10185 | 8.6 |
| 28.3.2012 | 31797 | 8954 | 22830.9 | 31784.9 | 14313 | 12.1 |
| 29.3.2012 | 31979 | 9481 | 22485.9 | 31966.9 | 14313 | 12.1 |
| 30.3.2012 | 29058 | 7430 | 21615.9 | 29045.9 | 14313 | 12.1 |
| 31.3.2012 | 24345 | 4146 | 20190.5 | 24336.5 | 10040 | 8.5 |
| 1.4.2012 | 21367 | 2435 | 18923.5 | 21358.5 | 10040 | 8.5 |
| 2.4.2012 | 19569 | 0 | 19560.5 | 19560.5 | 10040 | 8.5 |
| 3.4.2012 | 17950 | 0 | 17941.5 | 17941.5 | 10040 | 8.5 |
| 4.4.2012 | 16877 | 0 | 16859.6 | 16859.6 | 20510 | 17.4 |
| 5.4.2012 | 17264 | 0 | 17246.6 | 17246.6 | 20510 | 17.4 |
| 6.4.2012 | 17599 | 0 | 17592.1 | 17592.1 | 8184 | 6.9 |
| 7.4.2012 | 17052 | 0 | 17045.1 | 17045.1 | 8184 | 6.9 |
| 8.4.2012 | 16108 | 0 | 16101.1 | 16101.1 | 8184 | 6.9 |
| 9.4.2012 | 16137 | 0 | 16130.1 | 16130.1 | 8184 | 6.9 |
| 10.4.2012 | 17233 | 0 | 17226.1 | 17226.1 | 8184 | 6.9 |
| 11.4.2012 | 18608 | 0 | 18596.4 | 18596.4 | 13707 | 11.6 |
| | | | | | | |

LIITE 8

| | | | | | | |
|-----------|-------|-------|---------|---------|-------|------|
| 12.4.2012 | 22007 | 115 | 21880.4 | 21995.4 | 13707 | 11.6 |
| 13.4.2012 | 25613 | 4091 | 21510.4 | 25601.4 | 13707 | 11.6 |
| 14.4.2012 | 32817 | 10659 | 22148.3 | 32807.3 | 11390 | 9.7 |
| 15.4.2012 | 33205 | 12599 | 20596.3 | 33195.3 | 11390 | 9.7 |
| 16.4.2012 | 30551 | 13374 | 17167.3 | 30541.3 | 11390 | 9.7 |
| 17.4.2012 | 31986 | 16306 | 15670.3 | 31976.3 | 11390 | 9.7 |
| 18.4.2012 | 28399 | 11971 | 16416.2 | 28387.2 | 13940 | 11.8 |
| 19.4.2012 | 24594 | 8603 | 15979.2 | 24582.2 | 13940 | 11.8 |
| 20.4.2012 | 26333 | 9003 | 17318.2 | 26321.2 | 13940 | 11.8 |
| 21.4.2012 | 28054 | 9035 | 19008.0 | 28043.0 | 13000 | 11.0 |
| 22.4.2012 | 25080 | 6672 | 18397.0 | 25069.0 | 13000 | 11.0 |
| 23.4.2012 | 23668 | 4970 | 18687.0 | 23657.0 | 13000 | 11.0 |
| 24.4.2012 | 25366 | 5824 | 19531.0 | 25355.0 | 13000 | 11.0 |
| 25.4.2012 | 24317 | 5528 | 18778.0 | 24306.0 | 13000 | 11.0 |
| 26.4.2012 | 25611 | 6786 | 18814.0 | 25600.0 | 13000 | 11.0 |
| 27.4.2012 | 25377 | 6821 | 18549.2 | 25370.2 | 8064 | 6.8 |
| 28.4.2012 | 21473 | 3679 | 17787.2 | 21466.2 | 8064 | 6.8 |
| 29.4.2012 | 19161 | 2094 | 17060.2 | 19154.2 | 8064 | 6.8 |
| 30.4.2012 | 17746 | 478 | 17261.2 | 17739.2 | 8064 | 6.8 |
| 1.5.2012 | 16292 | 0 | 16285.2 | 16285.2 | 8064 | 6.8 |
| 2.5.2012 | 15765 | 0 | 15753.8 | 15753.8 | 13187 | 11.2 |
| 3.5.2012 | 13443 | 0 | 13431.8 | 13431.8 | 13187 | 11.2 |
| 4.5.2012 | 14548 | 0 | 14536.8 | 14536.8 | 13187 | 11.2 |
| 5.5.2012 | 15853 | 0 | 15841.9 | 15841.9 | 13113 | 11.1 |
| 6.5.2012 | 14473 | 49 | 14412.9 | 14461.9 | 13113 | 11.1 |
| 7.5.2012 | 29197 | 7490 | 21695.9 | 29185.9 | 13113 | 11.1 |
| 8.5.2012 | 20748 | 2803 | 17933.7 | 20736.7 | 13313 | 11.3 |
| 9.5.2012 | 18302 | 478 | 17812.7 | 18290.7 | 13313 | 11.3 |
| 10.5.2012 | 16708 | 0 | 16696.7 | 16696.7 | 13313 | 11.3 |
| 11.5.2012 | 21923 | 3001 | 18915.3 | 21916.3 | 7908 | 6.7 |
| 12.5.2012 | 19703 | 2859 | 16837.3 | 19696.3 | 7908 | 6.7 |
| 13.5.2012 | 17167 | 1885 | 15275.3 | 17160.3 | 7908 | 6.7 |
| 14.5.2012 | 16324 | 1070 | 15247.3 | 16317.3 | 7908 | 6.7 |
| 15.5.2012 | 15217 | 0 | 15210.3 | 15210.3 | 7908 | 6.7 |
| 16.5.2012 | 14241 | 0 | 14229.5 | 14229.5 | 13513 | 11.5 |
| 17.5.2012 | 14157 | 75 | 14070.5 | 14145.5 | 13513 | 11.5 |
| 18.5.2012 | 17950 | 172 | 17766.5 | 17938.5 | 13513 | 11.5 |
| 19.5.2012 | 14706 | 0 | 14697.3 | 14697.3 | 10215 | 8.7 |
| 20.5.2012 | 13848 | 0 | 13839.3 | 13839.3 | 10215 | 8.7 |
| 21.5.2012 | 13976 | 0 | 13967.3 | 13967.3 | 10215 | 8.7 |
| 22.5.2012 | 13521 | 0 | 13512.3 | 13512.3 | 10215 | 8.7 |
| 23.5.2012 | 12738 | 59 | 12667.4 | 12726.4 | 13687 | 11.6 |
| 24.5.2012 | 12341 | 0 | 12329.4 | 12329.4 | 13687 | 11.6 |
| 25.5.2012 | 11971 | 0 | 11959.4 | 11959.4 | 13687 | 11.6 |
| 26.5.2012 | 11576 | 0 | 11567.0 | 11567.0 | 10610 | 9.0 |
| 27.5.2012 | 10878 | 0 | 10869.0 | 10869.0 | 10610 | 9.0 |
| 28.5.2012 | 11722 | 31 | 11682.0 | 11713.0 | 10610 | 9.0 |
| 29.5.2012 | 11217 | 16 | 11192.0 | 11208.0 | 10610 | 9.0 |
| | | | | | | |
| 30.5.2012 | 10935 | 0 | 10923.4 | 10923.4 | 13680 | 11.6 |

LIITE 8

| | | | | | | |
|-----------|-------|------|---------|---------|-------|------|
| 31.5.2012 | 10769 | 0 | 10757.4 | 10757.4 | 13680 | 11.6 |
| 1.6.2012 | 10645 | | 10633.4 | 10633.4 | 13680 | 11.6 |
| 2.6.2012 | 18702 | 1127 | 17566.1 | 18693.1 | 10515 | 8.9 |
| 3.6.2012 | 12973 | | 12964.1 | 12964.1 | 10515 | 8.9 |
| 4.6.2012 | 12329 | | 12320.1 | 12320.1 | 10515 | 8.9 |
| 5.6.2012 | 11567 | | 11558.1 | 11558.1 | 10515 | 8.9 |
| 6.6.2012 | 11114 | | 11102.2 | 11102.2 | 13913 | 11.8 |
| 7.6.2012 | 10770 | | 10758.2 | 10758.2 | 13913 | 11.8 |
| 8.6.2012 | 10415 | | 10403.2 | 10403.2 | 13913 | 11.8 |
| 9.6.2012 | 9658 | | 9646.1 | 9646.1 | 14073 | 11.9 |
| 10.6.2012 | 9530 | | 9518.1 | 9518.1 | 14073 | 11.9 |
| 11.6.2012 | 9970 | | 9958.1 | 9958.1 | 14073 | 11.9 |
| 12.6.2012 | 9900 | | 9884.3 | 9884.3 | 18570 | 15.7 |
| 13.6.2012 | 9838 | | 9822.3 | 9822.3 | 18570 | 15.7 |
| 14.6.2012 | 9562 | | 9544.4 | 9544.4 | 20750 | 17.6 |
| 15.6.2012 | 9467 | | 9449.4 | 9449.4 | 20750 | 17.6 |
| 16.6.2012 | 8592 | | 8577.5 | 8577.5 | 17152 | 14.5 |
| 17.6.2012 | 11802 | | 11787.5 | 11787.5 | 17152 | 14.5 |
| 18.6.2012 | 10717 | | 10702.5 | 10702.5 | 17152 | 14.5 |
| 19.6.2012 | 10034 | | 10019.5 | 10019.5 | 17152 | 14.5 |
| 20.6.2012 | 9799 | | 9784.5 | 9784.5 | 17152 | 14.5 |
| 21.6.2012 | 9042 | | 9034.9 | 9034.9 | 8412 | 7.1 |
| 22.6.2012 | 7728 | | 7720.9 | 7720.9 | 8412 | 7.1 |
| 23.6.2012 | 10782 | 666 | 10108.9 | 10774.9 | 8412 | 7.1 |
| 24.6.2012 | 12459 | | 12451.9 | 12451.9 | 8412 | 7.1 |
| 25.6.2012 | 12229 | | 12221.9 | 12221.9 | 8412 | 7.1 |
| 26.6.2012 | 12011 | | 11993.5 | 11993.5 | 20610 | 17.5 |
| 27.6.2012 | 10691 | | 10673.5 | 10673.5 | 20610 | 17.5 |
| 28.6.2012 | 10589 | | 10571.1 | 10571.1 | 21170 | 17.9 |
| 29.6.2012 | 9989 | | 9971.1 | 9971.1 | 21170 | 17.9 |
| 30.6.2012 | 9065 | | 9054.8 | 9054.8 | 12073 | 10.2 |

LIITE 9

Taulukko 1. Hermanninsaaren jätevedenpuhdistamon fosforikuormat- ja pitoisuudet kevään 2012, toteutuneet arvot sekä laskennalliset arviot esisaostuksen vaikutuksista

| | lähtevä kg/d | vesis. mg/l | vesis. kg/d | ESL mg/l | ESL kg/d | ESL PAX kg/d | vesis. PAX mg/l | vesis. PAX kg/d |
|-----------|-----------------|----------------|----------------|-------------|-------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1.3.2012 | 1.63 | 0.18 | 1.63 | 7.21 | 25.23 | 3.95 | 0.18 | 1.63 |
| 2.3.2012 | 1.89 | 0.18 | 1.89 | 6.24 | 21.48 | 3.89 | 0.18 | 1.89 |
| 3.3.2012 | 1.78 | 0.18 | 1.78 | 6.63 | 21.10 | 3.60 | 0.18 | 1.78 |
| 4.3.2012 | 1.71 | 0.18 | 1.71 | 6.89 | 21.65 | 3.55 | 0.18 | 1.71 |
| 5.3.2012 | 1.77 | 0.18 | 1.77 | 6.68 | 21.55 | 3.65 | 0.18 | 1.77 |
| 6.3.2012 | 1.72 | 0.18 | 1.72 | 6.85 | 21.25 | 3.51 | 0.18 | 1.72 |
| 7.3.2012 | 1.71 | 0.18 | 1.71 | 6.89 | 21.90 | 3.59 | 0.18 | 1.71 |
| 8.3.2012 | 1.69 | 0.18 | 1.69 | 6.98 | 22.02 | 3.57 | 0.18 | 1.69 |
| 9.3.2012 | 1.67 | 0.18 | 1.67 | 7.04 | 21.81 | 3.50 | 0.18 | 1.67 |
| 10.3.2012 | 1.72 | 0.18 | 1.72 | 6.87 | 22.24 | 3.66 | 0.18 | 1.72 |
| 11.3.2012 | 1.85 | 0.18 | 1.85 | 6.39 | 23.53 | 4.16 | 0.18 | 1.85 |
| 12.3.2012 | 2.06 | 0.29 | 3.49 | 5.61 | 24.43 | 4.92 | 0.20 | 2.35 |
| 13.3.2012 | 2.10 | 0.18 | 2.10 | 5.62 | 24.87 | 5.00 | 0.18 | 2.10 |
| 14.3.2012 | 2.01 | 0.20 | 2.24 | 5.85 | 24.23 | 4.68 | 0.18 | 2.05 |
| 15.3.2012 | 1.99 | 0.18 | 1.99 | 5.92 | 24.20 | 4.62 | 0.18 | 1.99 |
| 16.3.2012 | 2.05 | 0.18 | 2.05 | 5.75 | 24.32 | 4.78 | 0.18 | 2.05 |
| 17.3.2012 | 2.14 | 0.18 | 2.14 | 5.52 | 25.02 | 5.12 | 0.18 | 2.14 |
| 18.3.2012 | 2.34 | 0.18 | 2.34 | 5.04 | 26.21 | 5.88 | 0.18 | 2.34 |
| 19.3.2012 | 2.56 | 0.18 | 2.56 | 4.60 | 27.65 | 6.79 | 0.18 | 2.56 |
| 20.3.2012 | 2.82 | 0.18 | 2.82 | 4.19 | 29.05 | 7.84 | 0.18 | 2.82 |
| 21.3.2012 | 2.82 | 0.18 | 2.95 | 4.17 | 29.37 | 7.96 | 0.18 | 2.86 |
| 22.3.2012 | 3.11 | 0.18 | 3.11 | 3.79 | 28.61 | 8.52 | 0.18 | 3.11 |
| 23.3.2012 | 4.01 | 0.29 | 6.80 | 2.82 | 30.39 | 12.17 | 0.22 | 5.12 |
| 24.3.2012 | 4.16 | 0.23 | 5.44 | 2.78 | 30.44 | 12.36 | 0.19 | 4.68 |
| 25.3.2012 | 4.12 | 0.21 | 5.00 | 2.83 | 30.29 | 12.10 | 0.19 | 4.47 |
| 26.3.2012 | 3.77 | 0.19 | 4.00 | 3.12 | 30.27 | 10.98 | 0.18 | 3.86 |
| 27.3.2012 | 4.25 | 0.57 | 16.91 | 2.25 | 32.06 | 16.11 | 0.36 | 10.61 |
| 28.3.2012 | 4.02 | 0.72 | 22.88 | 2.11 | 32.41 | 17.39 | 0.44 | 14.14 |
| 29.3.2012 | 3.96 | 0.74 | 23.82 | 2.09 | 32.24 | 17.40 | 0.46 | 14.68 |
| 30.3.2012 | 3.81 | 0.72 | 20.93 | 2.30 | 31.26 | 15.33 | 0.42 | 12.21 |
| 31.3.2012 | 3.56 | 0.61 | 14.96 | 2.75 | 29.94 | 12.30 | 0.34 | 8.24 |
| 1.4.2012 | 3.34 | 0.51 | 10.97 | 3.13 | 29.11 | 10.50 | 0.28 | 6.09 |
| 2.4.2012 | 3.45 | 0.18 | 3.45 | 3.42 | 28.90 | 9.54 | 0.18 | 3.45 |
| 3.4.2012 | 3.16 | 0.18 | 3.16 | 3.73 | 28.57 | 8.66 | 0.18 | 3.16 |
| 4.4.2012 | 2.97 | 0.18 | 2.97 | 3.97 | 27.83 | 7.93 | 0.18 | 2.97 |
| 5.4.2012 | 3.04 | 0.18 | 3.04 | 3.88 | 28.28 | 8.24 | 0.18 | 3.04 |
| 6.4.2012 | 3.10 | 0.18 | 3.10 | 3.80 | 28.14 | 8.36 | 0.18 | 3.10 |
| 7.4.2012 | 3.00 | 0.18 | 3.00 | 3.93 | 27.22 | 7.83 | 0.18 | 3.00 |
| 8.4.2012 | 2.84 | 0.18 | 2.84 | 4.16 | 26.32 | 7.16 | 0.18 | 2.84 |
| 9.4.2012 | 2.84 | 0.18 | 2.84 | 4.15 | 25.92 | 7.06 | 0.18 | 2.84 |
| 10.4.2012 | 3.04 | 0.18 | 3.04 | 3.89 | 26.27 | 7.64 | 0.18 | 3.04 |
| 11.4.2012 | 3.28 | 0.18 | 3.28 | 3.60 | 26.71 | 8.39 | 0.18 | 3.28 |
| 12.4.2012 | 3.86 | 0.19 | 4.21 | 3.04 | 27.42 | 10.18 | 0.18 | 3.99 |

LIITE 9

| | | | | | | | | |
|-----------|------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| 13.4.2012 | 3.79 | 0.57 | 14.49 | 2.61 | 28.32 | 12.24 | 0.33 | 8.41 |
| 14.4.2012 | 3.90 | 0.78 | 25.65 | 2.04 | 30.46 | 16.87 | 0.49 | 15.95 |
| 15.4.2012 | 3.63 | 0.87 | 29.04 | 2.02 | 30.81 | 17.27 | 0.54 | 17.87 |
| 16.4.2012 | 3.03 | 1.06 | 32.34 | 2.19 | 39.30 | 20.26 | 0.59 | 18.14 |
| 17.4.2012 | 2.76 | 1.15 | 36.90 | 2.09 | 43.90 | 23.70 | 0.66 | 21.19 |
| 18.4.2012 | 2.89 | 1.10 | 31.12 | 2.36 | 44.29 | 21.23 | 0.58 | 16.42 |
| 19.4.2012 | 2.82 | 1.07 | 26.24 | 2.72 | 43.54 | 18.07 | 0.51 | 12.54 |
| 20.4.2012 | 3.05 | 0.99 | 25.95 | 2.54 | 38.20 | 16.97 | 0.50 | 13.23 |
| 21.4.2012 | 3.35 | 0.89 | 24.92 | 2.39 | 33.39 | 15.81 | 0.48 | 13.56 |
| 22.4.2012 | 3.24 | 0.84 | 21.06 | 2.67 | 33.77 | 14.29 | 0.43 | 10.78 |
| 23.4.2012 | 3.29 | 0.73 | 17.35 | 2.83 | 33.70 | 13.46 | 0.38 | 8.91 |
| 24.4.2012 | 3.44 | 0.74 | 18.82 | 2.64 | 34.06 | 14.58 | 0.40 | 10.02 |
| 25.4.2012 | 3.31 | 0.76 | 18.53 | 2.75 | 33.50 | 13.75 | 0.39 | 9.56 |
| 26.4.2012 | 3.32 | 0.82 | 21.06 | 2.61 | 34.34 | 14.84 | 0.43 | 10.98 |
| 27.4.2012 | 3.27 | 0.84 | 21.27 | 2.64 | 34.12 | 14.61 | 0.43 | 10.98 |
| 28.4.2012 | 3.13 | 0.68 | 14.61 | 3.12 | 33.32 | 12.08 | 0.34 | 7.29 |
| 29.4.2012 | 3.01 | 0.54 | 10.32 | 3.49 | 33.11 | 10.71 | 0.28 | 5.37 |
| 30.4.2012 | 3.04 | 0.27 | 4.85 | 3.77 | 26.69 | 7.99 | 0.20 | 3.58 |
| 1.5.2012 | 2.87 | 0.18 | 2.87 | 4.11 | 22.49 | 6.18 | 0.18 | 2.87 |
| 2.5.2012 | 2.78 | 0.18 | 2.78 | 4.25 | 22.49 | 5.98 | 0.18 | 2.78 |
| 3.5.2012 | 2.37 | 0.18 | 2.37 | 4.98 | 21.87 | 4.96 | 0.18 | 2.37 |
| 4.5.2012 | 2.56 | 0.18 | 2.56 | 4.60 | 16.68 | 4.10 | 0.18 | 2.56 |
| 5.5.2012 | 2.79 | 0.18 | 2.79 | 4.22 | 12.82 | 3.43 | 0.18 | 2.79 |
| 6.5.2012 | 2.54 | 0.19 | 2.77 | 4.63 | 12.09 | 2.95 | 0.18 | 2.60 |
| 7.5.2012 | 3.82 | 0.72 | 21.00 | 2.29 | 20.91 | 10.30 | 0.42 | 12.29 |
| 8.5.2012 | 3.16 | 0.59 | 12.21 | 3.23 | 21.86 | 7.65 | 0.31 | 6.33 |
| 9.5.2012 | 3.14 | 0.27 | 4.89 | 3.66 | 20.84 | 6.44 | 0.20 | 3.68 |
| 10.5.2012 | 2.94 | 0.18 | 2.94 | 4.01 | 20.39 | 5.75 | 0.18 | 2.94 |
| 11.5.2012 | 3.33 | 0.57 | 12.50 | 3.05 | 23.41 | 8.66 | 0.31 | 6.72 |
| 12.5.2012 | 2.97 | 0.64 | 12.68 | 3.40 | 22.28 | 7.41 | 0.31 | 6.20 |
| 13.5.2012 | 2.69 | 0.59 | 10.04 | 3.90 | 20.50 | 5.94 | 0.28 | 4.82 |
| 14.5.2012 | 2.69 | 0.43 | 7.08 | 4.10 | 19.59 | 5.40 | 0.24 | 3.90 |
| 15.5.2012 | 2.68 | 0.18 | 2.68 | 4.40 | 19.42 | 4.99 | 0.18 | 2.68 |
| 16.5.2012 | 2.51 | 0.18 | 2.51 | 4.70 | 18.90 | 4.54 | 0.18 | 2.51 |
| 17.5.2012 | 2.48 | 0.20 | 2.83 | 4.73 | 19.08 | 4.56 | 0.18 | 2.56 |
| 18.5.2012 | 3.13 | 0.21 | 3.77 | 3.73 | 21.63 | 6.55 | 0.19 | 3.33 |
| 19.5.2012 | 2.59 | 0.18 | 2.59 | 4.55 | 19.42 | 4.82 | 0.18 | 2.59 |
| 20.5.2012 | 2.44 | 0.18 | 2.44 | 4.84 | 18.72 | 4.37 | 0.18 | 2.44 |
| 21.5.2012 | 2.46 | 0.18 | 2.46 | 4.79 | 15.39 | 3.63 | 0.18 | 2.46 |
| 22.5.2012 | 2.38 | 0.18 | 2.38 | 4.95 | 12.15 | 2.77 | 0.18 | 2.38 |
| 23.5.2012 | 2.23 | 0.20 | 2.54 | 5.26 | 9.35 | 2.01 | 0.18 | 2.30 |
| 24.5.2012 | 2.17 | 0.18 | 2.17 | 5.43 | 8.77 | 1.83 | 0.18 | 2.17 |
| 25.5.2012 | 2.11 | 0.18 | 2.11 | 5.59 | 8.94 | 1.81 | 0.18 | 2.11 |
| 26.5.2012 | 2.04 | 0.18 | 2.04 | 5.78 | 8.71 | 1.70 | 0.18 | 2.04 |
| 27.5.2012 | 1.92 | 0.18 | 1.92 | 6.16 | 8.21 | 1.51 | 0.18 | 1.92 |
| 28.5.2012 | 2.06 | 0.19 | 2.24 | 5.71 | 8.81 | 1.74 | 0.18 | 2.09 |
| 29.5.2012 | 1.97 | 0.18 | 2.07 | 5.97 | 9.83 | 1.86 | 0.18 | 1.99 |
| 30.5.2012 | 1.93 | 0.18 | 1.93 | 6.12 | 22.08 | 4.07 | 0.18 | 1.93 |
| 31.5.2012 | 1.90 | 0.18 | 1.90 | 6.22 | 32.74 | 5.95 | 0.18 | 1.90 |

LIITE 9

| | | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| | | | | | | | | |
| 1.6.2012 | 1.87 | 0.18 | 1.87 | 6.29 | 33.12 | 5.95 | 0.18 | 1.87 |
| 2.6.2012 | 3.10 | 0.38 | 7.13 | 3.58 | 36.90 | 11.64 | 0.23 | 4.37 |
| 3.6.2012 | 2.28 | 0.18 | 2.28 | 5.16 | 34.53 | 7.56 | 0.18 | 2.28 |
| 4.6.2012 | 2.17 | 0.18 | 2.17 | 5.43 | 33.56 | 6.98 | 0.18 | 2.17 |
| 5.6.2012 | 2.04 | 0.18 | 2.04 | 5.79 | 32.54 | 6.35 | 0.18 | 2.04 |
| 6.6.2012 | 1.96 | 0.18 | 1.96 | 6.02 | 31.97 | 6.00 | 0.18 | 1.96 |
| 7.6.2012 | 1.90 | 0.18 | 1.90 | 6.22 | 31.22 | 5.67 | 0.18 | 1.90 |
| 8.6.2012 | 1.83 | 0.18 | 1.83 | 6.43 | 31.40 | 5.52 | 0.18 | 1.83 |
| 9.6.2012 | 1.70 | 0.18 | 1.70 | 6.93 | 30.44 | 4.96 | 0.18 | 1.70 |
| 10.6.2012 | 1.68 | 0.18 | 1.68 | 7.03 | 29.90 | 4.81 | 0.18 | 1.68 |
| 11.6.2012 | 1.76 | 0.18 | 1.76 | 6.72 | 30.59 | 5.15 | 0.18 | 1.76 |
| 12.6.2012 | 1.74 | 0.18 | 1.74 | 6.76 | 29.94 | 5.00 | 0.18 | 1.74 |
| 13.6.2012 | 1.73 | 0.18 | 1.73 | 6.81 | 30.22 | 5.02 | 0.18 | 1.73 |
| 14.6.2012 | 1.68 | 0.18 | 1.68 | 7.00 | 29.74 | 4.80 | 0.18 | 1.68 |
| 15.6.2012 | 1.67 | 0.18 | 1.67 | 7.07 | 29.58 | 4.73 | 0.18 | 1.67 |
| 16.6.2012 | 1.51 | 0.18 | 1.51 | 7.79 | 28.45 | 4.13 | 0.18 | 1.51 |
| 17.6.2012 | 2.08 | 0.18 | 2.08 | 5.67 | 31.05 | 6.18 | 0.18 | 2.08 |
| 18.6.2012 | 1.89 | 0.18 | 1.89 | 6.25 | 30.00 | 5.43 | 0.18 | 1.89 |
| 19.6.2012 | 1.77 | 0.18 | 1.77 | 6.67 | 29.32 | 4.96 | 0.18 | 1.77 |
| 20.6.2012 | 1.72 | 0.18 | 1.72 | 6.83 | 23.58 | 3.90 | 0.18 | 1.72 |
| 21.6.2012 | 1.59 | 0.18 | 1.59 | 7.41 | 14.31 | 2.18 | 0.18 | 1.59 |
| 22.6.2012 | 1.36 | 0.18 | 1.36 | 8.66 | 12.96 | 1.69 | 0.18 | 1.36 |
| 23.6.2012 | 1.78 | 0.55 | 5.92 | 6.21 | 18.62 | 3.39 | 0.24 | 2.53 |
| 24.6.2012 | 2.19 | 0.18 | 2.19 | 5.37 | 18.24 | 3.83 | 0.18 | 2.19 |
| 25.6.2012 | 2.15 | 0.18 | 2.15 | 5.48 | 18.55 | 3.83 | 0.18 | 2.15 |
| 26.6.2012 | 2.11 | 0.18 | 2.11 | 5.57 | 18.35 | 3.72 | 0.18 | 2.11 |
| 27.6.2012 | 1.88 | 0.18 | 1.88 | 6.26 | 16.67 | 3.01 | 0.18 | 1.88 |
| 28.6.2012 | 1.86 | 0.18 | 1.86 | 6.32 | 15.90 | 2.84 | 0.18 | 1.86 |
| 29.6.2012 | 1.76 | 0.18 | 1.76 | 6.70 | 15.32 | 2.58 | 0.18 | 1.76 |
| 30.6.2012 | 1.60 | 0.18 | 1.60 | 7.39 | 14.21 | 2.17 | 0.18 | 1.60 |